



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV STRUKTURY MATERIÁLU A POVRCHOVÝCH
ÚPRAV NA OBROBITELNOST**

INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF THE MATERIAL AND SURFACE TREATMENTS ON MACHINABILITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Foral

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jakub Foral**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Milan Kalivoda**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv struktury materiálu a povrchových úprav na obrobitelnost

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provedení experimentů a posouzení problémů s materiálem ve strojírenské firmě.

Cíle bakalářské práce:

- Používané materiály ve firmě
- Negativní jevy působící na obrobitelnost
- Zhotovení zkušebních vzorků
- Vyhodnocení vad ve vzorcích

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. Nástrojové oceli. Brno: Dům techniky Brno, 1994. 234 s.

IMAI, Masaaki. Kaizen. Brno: Computer Press, a. s., 2004. 272 s. ISBN 80-251-0461-3.

LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 2000. 986 s. ISBN 80-7183-164-6.

PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojírenská metrologie II. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Příručka obrábění, kniha pro praktiky. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

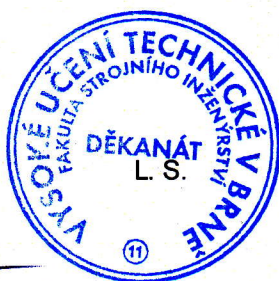
SHAW, Milton Clayton. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. p. 651. ISBN 0-19-514206-3.

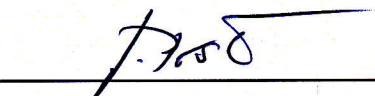
ZDRAVECKÁ, Eva a Ján KRÁL'. Základy strojárenskej výroby. 2. vyd. Košice: Elfa, 2004. 143 s. ISBN 80-89066-72-9.

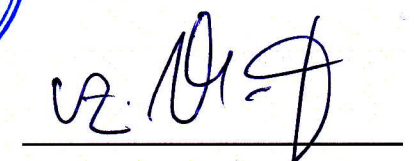
ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 26. 10. 2017




prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu


doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce popisuje vliv struktury materiálu na obrobitelnost. V práci je objasněný pojem obrobitelnost, dále vybrané materiály a u nich jevy, které působí na obrobitelnost. U konkrétního materiálu byly zhotoveny experimenty tvrdosti, mikrostruktura a tvar třísek. Závěr práce je věnován diskuzi a vyhodnocení získaných poznatků z těchto experimentů.

Klíčová slova

obrobitelnost, žíhání, chemické složení, tříska, tvrdost

ABSTRACT

This bachelor thesis describes the effect of the structure of a material on its machinability. The term of machinability is clarified in the thesis as well as chosen materials and factors which affect their machinability. The hardness, microstructure and shape of chips were studied at the specific materials. The conclusion is devoted to discussion and evaluation of data gained from the experiments.

Key words

machinability, annealing, chemical structure, chip, hardness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FORAL, Jakub. *Vliv struktury materiálu a povrchových úprav na obrobitelnost*. Brno 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 54 s. 2 příloh. Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vliv struktury materiálu a povrchových úprav na obrobitelnost** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25.5.2018

Datum

Jakub Foral

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Milanu Kalivodovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji firmě Metaldyne s.r.o. za spolupráci a umožnění zhotovení vzorků, jmenovitě děkuji především Ing. Radku Dubšíkovi za poskytnutí cenných informací.

V poslední řadě děkuji své rodině a všem mým blízkým za podporu při studiu.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 OBROBITELNOST.....	9
1.1 ZKOUŠKY OBROBITELNOSTI.....	10
1.1.1 Dlouhodobá zkouška.....	10
1.1.2 Krátkodobé zkoušky	12
1.2 ZÁKLADNÍ SKUPINY PRO VYHODNOCOVÁNÍ OBROBITELNOSTI	13
1.3 MATERIÁLOVÉ SLOŽKY OVLIVŇUJÍCÍ OBROBITELNOST	14
1.3.1 Legující prvky.....	15
1.3.2 Tepelná vodivost.....	16
1.3.3 Mikrostruktura	16
1.3.4 Vměstky	17
1.3.5 Deformační zpevňování.....	17
1.3.6 Tvrdost, tvárnost a pevnost.....	17
1.3.7 Stav materiálu obrobku.....	18
2 VYBRANÉ MATERIÁLY A JEJICH OBROBITELNOST	23
2.1 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY VE FIRMĚ	23
2.1.1 C4C	23
2.1.2 16MnCr5.....	23
2.1.3 20MnCr5.....	24
2.2 UHLÍKOVÉ OCELI	24
2.3 LITINY	25
2.4 SLITINY HLINÍKU.....	26
2.5 SLITINY HOŘČÍKU	26
2.6 SLITINY TITANU	27
3 ZHOTOVENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	28
3.1 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	29
3.1.1 Žihání na měkko	29

3.1.2	Normalizační žíhání	30
3.2	ZKOUŠKA TVRDOST	30
3.3	MIKROSTRUKTURA	32
3.4	SOUSTRUŽENÍ	35
4	VYHODNOCENÍ VZORKŮ	37
4.1	SOUSTRUŽENÍ	37
4.2	TVRDOST	41
4.3	MIKROSTRUKTURA	42
4.4	MIKROČISTOTA	47
5	DISKUZE	48
5.1	VYSVĚTLENÍ POJMŮ	48
5.2	VZNIKNUITÉ PROBLÉMY	48
5.3	NEGATIVNÍ JEvy VE STRUKTUŘE	48
	ZÁVĚR	49
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	50
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	52
	SEZNAM PŘÍLOH	54

ÚVOD

Jedním z hlavních cílů většiny strojírenských společností, zabývajících se obráběním, je udržení co nejvyšší kvality vyráběných součástí a zároveň snaha o minimalizaci nákladů produkce. Hlavním faktorem, ovlivňující splnění těchto požadavků, je právě obrobitelnost. Obrobitelnost je v dnešní době široký pojem ovlivněný celou řadou faktorů, avšak ani jeden z nich nemůže být brán jako absolutní hodnota.

Řada firem má problémy s určením správnosti dané obrobitelnosti u konkrétního materiálu, proto daný postup obrábění nemusí být vždy ten např. ekonomicky nejvýhodnější. Bakalářská práce je rozdělena do tří částí. První část práce je věnována problematice obrobitelnosti. Dále práce popisuje vybrané materiály, u kterých jsou přiblíženy faktory ovlivňující obrobitelnost. Druhá část objasňuje výběr a zhotovení zkušebních vzorků, na kterých byly následně provedeny experimenty zhodnocené v následujících kapitolách. Experimentální část práce byla zhotovena ve spolupráci s firmou Metaldyne s. r. o. se sídlem v Oslavanech. Závěrem práce je provedena diskuze a zhodnocení výstupů jednotlivých experimentů.

1 OBROBITELNOST

Obrobitelnost můžeme definovat jako souhrnný vliv fyzikálních vlastností a chemického složení na průběh řezání. Do obrobitelnosti však patří další důležité aspekty, jako např. ekonomika a kvalita povrchu. Obrobitelnost můžeme posuzovat z několika pohledů [1]:

- vliv materiálu obrobku na intenzitu otěru,
- energetická bilance průběhu řezání,
- tvoření třísky,
- povrch obrobku.

Nejdůležitějšími faktory, které ovlivňují obrobitelnost jsou [1]:

- výroba a tepelné zpracování obrobku,
- mikrostruktura obrobku,
- chemické složení obrobku,
- fyzikální a mechanické vlastnosti obrobku,
- druh obrábění,
- řezné podmínky,
- prostředí,
- geometrie nástroje,
- materiál nástroje.

Obrobitelnost patří mezi nejdůležitější vlastnosti materiálu z pohledu obrábění, však popsat absolutní hodnotou jde jen velmi obtížně. Mezi absolutní veličiny lze zařadit objem odebraného materiálu, velikost obrobené plochy a řeznou dráhu.

V praxi se používají zkoušky relativní. Tyto zkoušky využívají etalon, který je vybrán pro každou skupinu. Relativní hodnocení se může provést několika způsoby, lze použít hodnoty veličin celkové nebo přepočtené (měrné), specifické. Při obrábění pevně vymezených podmínek to jsou například tyto veličiny [1]:

- velikost celkové síly, řezné síly, pasivní síly, posuvových a řezných momentů,
- velikost celkové energie, které jsou potřeba k odebrání určité vrstvy daného materiálu při určité kvalitě povrchu,
- velikost teploty řezání,
- druh dělení a vytváření třísky.

Při posuzování měrných veličin obrábění se jedná hlavně o velikosti [1]:

- měrných sil řezných,
- měrné obráběcí energie,
- součinitel tření na hřbetu a čele nástroje,
- odhadnuté meze pevnosti v tahu/tlaku,
- intenzity odírání bříty.

V současné době se jedná především o tyto charakteristické veličiny. Tyto veličiny lze využít při předpovědi zatížení nástrojů pro různé podmínky obrábění [1].

Pro každý způsob hodnocení obrobitelnosti odpovídá, pak i způsob zkoušek, popř. kritéria obrobitelnosti. Kritériem stupně obrobitelnosti je v případě velikosti řezné síly při obrábění, pro všechny provedené zkoušky konstantní řeznou rychlostí, stejným posuvem a šířkou třísky. Například intenzita opotřebení bříty patří mezi hodnocení obrobitelnosti k zásadním metodám, předností je slušná objektivita výsledků. Nevýhodou je časová náročnost. Stupeň obrobitelnosti není stejný při jednotlivých metodách obrábění jako jsou například soustružení, broušení a frézování, proto každé zkoušky je třeba udělat pro jednotlivé typy obrábění zvlášť [1].

1.1 Zkoušky obrobitelnosti

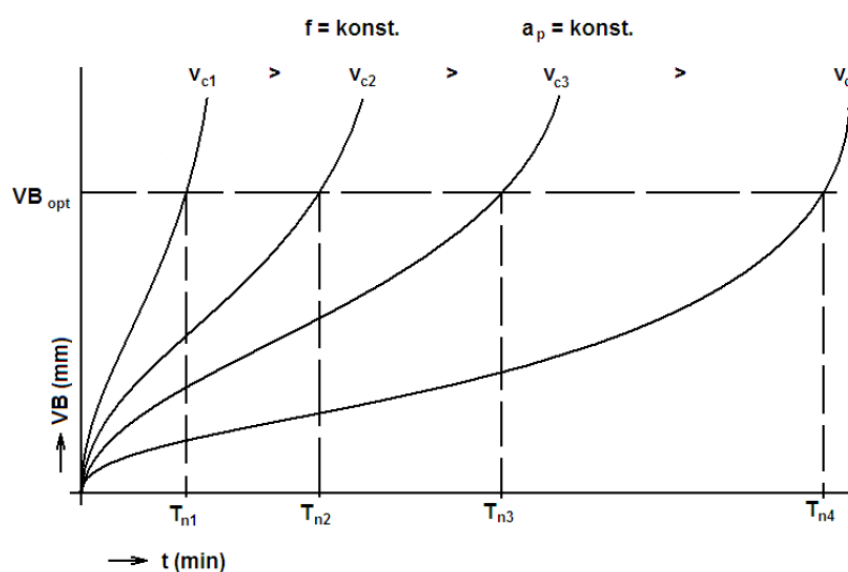
Zkoušky se rozlišují na dlouhodobé a krátkodobé. Metody můžeme dále se rozdělit na přímé a nepřímé. U přímých metod se určí hodnota řezné rychlosti pro danou trvanlivost [2].

1.1.1 Dlouhodobá zkouška

Realizuje se soustružením, popř. frézováním za konstantních řezných podmínek. Pro stanovený druh nástroje a jeho geometrií se obrábí pomocí odstupňovaných řezných rychlostí až do daného opotřebení bříty [1; 2].

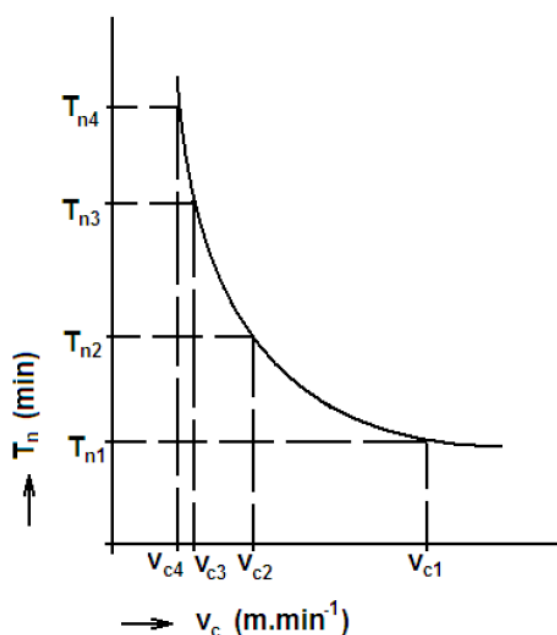
Průběh dlouhodobá zkouška trvanlivosti:

1) Změří se časový vývoj opotřebení na hřbetu nástroje VB_B pro několik daných hodnot rychlostí při neměnných řezných parametrech a sestaví se křivky otupení (obr. 1) [2].



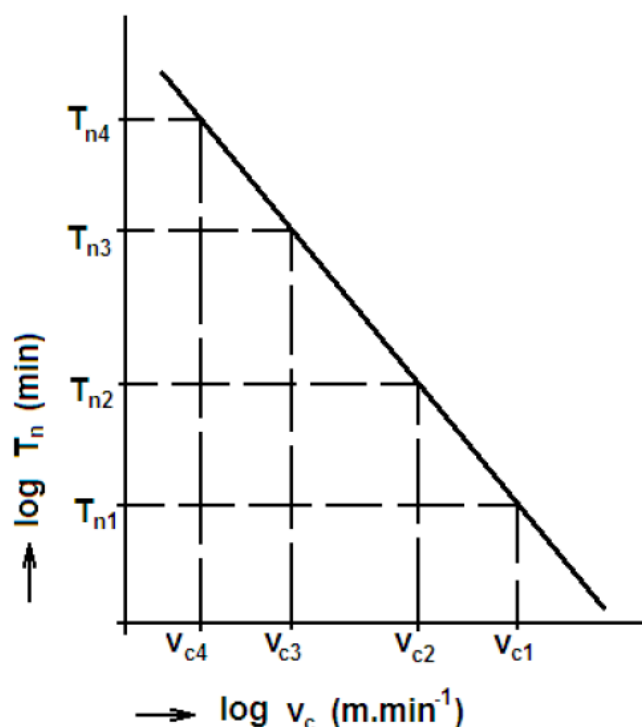
Obr. 1 Křivky otupení při proměnné řezné rychlosti [2].

2) Vymezí se kritérium opotřebení VB_{opt} a tím se stanoví trvanlivost břitu pro každou řeznou rychlost (obr. 2) [2].



Obr. 2 Stanovení jednotlivých trvanlivostí na základě kritéria opotřebení [2].

3) Sestaví se závislost $T_n = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích a pro danou trvanlivost je možné určit index obrobitelnosti při srovnání řezné rychlosti zkoumaného materiálu s řeznou rychlostí etalonového materiálu (obr. 1.3) [2].



Obr. 3 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti [2].

1.1.2 Krátkodobé zkoušky

Zkoušky krátkodobé jsou v porovnání se zkouškou dlouhodobou méně objektivní a přesné, ale z časového hlediska jsou nesrovnatelně kratší s nižší spotřebou materiálu. V dnešní době při rychlém vývoji jsou tyto zkoušky zvláště důležité pro svoji rychlost a dostatečnou přesnost. Používají se zejména pro třískové obrábění s definovanou řeznou geometrií břitů nástroje [1].

Vhodnost najdeme zejména při roztržení materiálu do skupin podle stupně obrobitelnosti, pro ověření případné změny stupně obrobitelnosti u jednotlivých dávek stejného druhu materiálu nebo pro stanovení relativního stupně obrobitelnosti z oddělených taveb a u nově vyvíjejících se materiálů [2].

Podle použitého kritéria lze tyto zkoušky dělit na přímé a nepřímé. Přímé určování intenzity opotřebení za vystupňovaných nebo smluvně upravených podmínek. Nepřímé určování vychází ze známého vztahu mezi charakteristickými parametry řezného procesu a opotřebením břitů. Zjišťují se především energetické parametry [2].

Přímé metody [2]:

- čelní krátkodobá zkouška,
- mikrozkouška trvanlivosti,

- nástroj se sníženou řezivostí,
- snížení míry opotřebení,
- zvýšením řezné rychlosti.

Nepřímé metody [2]:

- měření sil při obrábění,
- srovnání tvrdosti,
- mikrometrická metoda,
- srovnání tvaru třísky,
- Leyensetterova metoda,
- vrtání při neměnném tlaku,
- měření teploty při řezání,
- měření hloubky zpevněné vrstvy.

1.2 Základní skupiny pro vyhodnocování obrobiteľnosti

Podle celostátní normy a normativy se rozdělují konstrukční materiály pro potřeby vyhodnocování do základních devíti skupin (tab. 1) [1].

Tab. 1 Označení základních skupin [1].

označení	materiál
a	litiny
b	oceli
c	těžké neželezné kovy, měď a jeho slitiny
d	lehké neželezné kovy, hliník a jeho slitiny
e	plastické hmoty
f	přírodní nerostné suroviny
g	vrstvené hmoty
h	pryže
v	tvrzené litiny pro výrobu válců

V každé skupině je vždy vybrán jeden konkrétní materiál a ten slouží jako etalon obrobiteľnosti. Od tohoto materiálu se poté stanoví relativní obrobiteľnost všech ostatních

materiálů celé skupiny. Materiály jsou dále děleny do tříd obrobiteľnosti a to na základě indexu kinetické obrobiteľnosti (vztah 1) [1].

$$i_0 = \frac{v_{c15}}{v_{c15et}} \quad (1)$$

Číslem jsou označovány třídy, které jsou umístěny před písmeno, a to určuje danou skupinu materiálů. Odstupňování střední hodnoty indexu obrobiteľnosti v daných třídách je dáno geometrickou řadou (např. pro oceli s kvocientem $q = \sqrt[10]{10} = 1,26$, třída etalonového materiálu má hodnotu $i_0 = 1$) což znamená, že u toho konkrétního materiálu je hodnota řezné rychlosti v_{cT} v dané třídě vždy 1,26-krát nižší/vyšší než hodnota v_{cT} v třídě sousední. Materiály v třídách, které mají nižší číslo, než má etalonový materiál v dané třídě mají horší obrobiteľnost než etalonový materiál. Naopak materiály, které mají vyšší číslo, než etalonový materiál mají lepší obrobiteľnost. Relativně nejlepší obrobiteľnost v konkrétní skupině má vždy materiál zařazený do třídy s nejvyšším číslem, nejhorší obrobiteľnost má materiál s nejnižším číslem (tab. 2) [1].

Tab. 2 Přehled skupin materiálů, tříd obrobiteľnosti a etalonů pro obrábění [1].

Rozsah tříd obrobiteľnosti	Skupina materiálů	Etalon	zařazení v třídě
1a-14a	litiny a temperované litiny	šedá litina nelegovaná, ČSN 42 2420	10a
1b-20b	oceli a oceli na odlitky	ušlechtilá uhlíková ocel, ČSN 41 2050.1	14b
2c-15c	těžké neželezné kovy	automatová mosaz tvářená za tepla, ČSN 42 3213.21	11c
4d-16d	lehké neželezné kovy	tvářená slitina hliníku, vytvrzená, ČSN 42 4380.11	10d

1.3 Materiálové složky ovlivňující obrobiteľnost

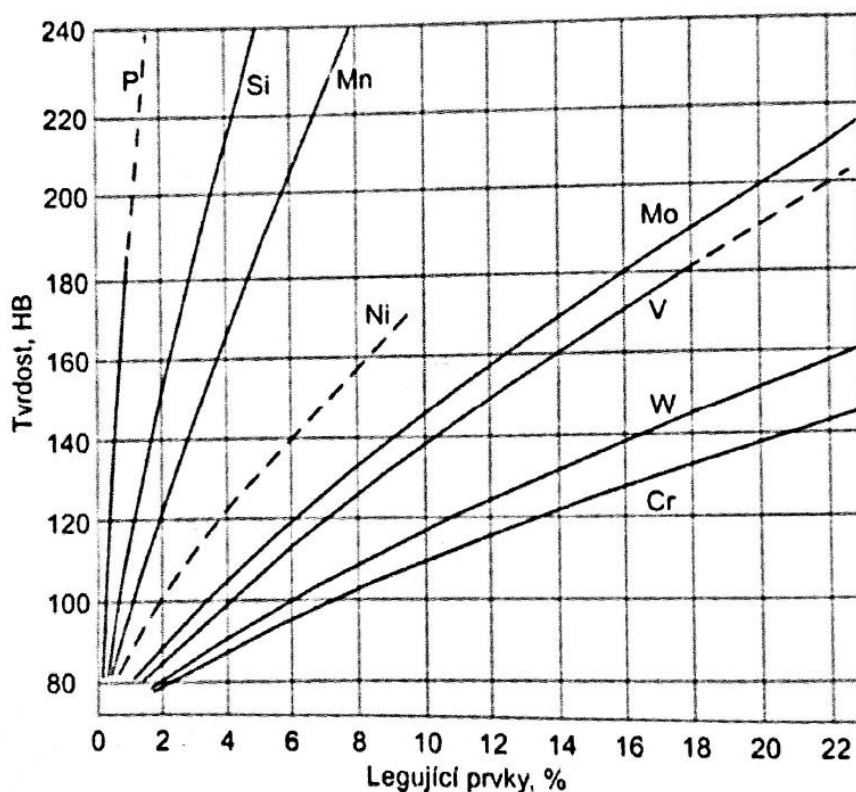
Na obrobiteľnost působí řada různých faktorů, které zvyšují nebo snižují obrobiteľnost. Mezi hlavní materiálové vlastnosti, které zásadně ovlivňují obrobiteľnost patří [3]:

- legující prvky,
- deformační zpevnění,
- mikrostruktura,
- příměsi,
- tepelná vodivost,

- tvrdost, pevnost tvárnost,
- nečistoty.

1.3.1 Legující prvky

Vůbec nejdůležitější přísadou materiálu z hlediska účinků, které mají jsou legující prvky. Například čisté železo obsahuje přibližně 0,04 % C a jeho tvrdost je zhruba 80 HB. Pokud je přidán legující prvek dojde ke zvýšení tvrdosti železa. Stupeň zvýšení tvrdosti závisí na konkrétním prvku (obr. 4) [3].



Obr. 4 Tvrdost v závislosti na legujících prvcích [3].

Uhlík je nejdůležitější prvkem v uhlíkové oceli, nízkolegované oceli a ve většině nástrojových ocelí. Dalšími legujícími prvky jsou mangan (Mn), nikl (Ni), chrom (Cr) a karbidotvorné prvky např. wolfram (W) a vanad (V). Nikl a kobalt zvyšují hromadění materiálu na řezném nástroji. Naopak například ložisková ocel, která obsahuje 1,5 % Cr a zhruba 1 % C vykazuje omezené ulpívání na řezném nástroji, proto se u těchto ocelí nevyskytují problémy při odlamování třísky. Problémy, které mohou nastat jsou především v rychlém opotřebení nástroje, to způsobují tvrdé karbidy. Oxidy a karbidy prvků jako například chrom (Cr), vanad (V), wolfram (W) nebo hliník (Al), zvyšují opotřeбенé řezného nástroje. V pozitivním slova smyslu ovlivňují obrobiteľnosť například olovo (Pb) a síra (S),

které během obráběcího procesu mají mazací účinek. Fosfor (P) a síra (S) usnadňují odlamování třísky. Mangan (Mn) podporuje rozpustnost uhlíku v oceli. V oceli při obsahu 0,2 % uhlíku se manganu vyskytuje přibližně 1 %. Zvýšením procenta manganu se zvýší pevnost a houževnatost oceli a tím se zhorší obrobitelnost. Křemík (Si) a především jeho sloučeniny (např. SiO_2) zvyšují abrazivní, brusný otěr, proto má negativní účinek na obrobitelnost. Vybrané legující prvky a jejich vliv na obrobitelnost [1], [3], [4].

1.3.2 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost značně ovlivňuje obrobitelnost. Materiály mající dobrou tepelnou vodivost je odchod tepla do okolního prostředí daleko lepší než u materiálů se špatnou tepelnou vodivostí. Odchod tepla s dobrou vodivostí je zejména pomocí třísky, u materiálu s nižší vodivostí je odchod tepla zejména do břitu, což je nežádoucí. Například měď má tepelnou vodivost $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, tak např. titan má tepelnou vodivost jen $17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Tyto velké rozdíly vedou k výběru řezných materiálů, řezných rychlostí a zvážení potřeby chlazení [3].

1.3.3 Mikrostruktura

Uhlíkové oceli mohou obsahovat různé fáze. Obsah uhlíku, fáze v uhlíkové oceli a jejich tvrdost jsou uvedeny (tab. 3) [3].

Tab. 3 Strukturní fáze oceli [3].

Fáze	Uhlík (%)	Tvrdost
Ferit	$\leq 0,06$	$\approx 90 \text{ HB}$
Perlit	0,85	275 HB
Cementit	6,67	$> 67 \text{ HRC}$
Martenzit	mění se	$< 67 \text{ HRC}$
Bainit	mění se	40 až 60 HRC
Austenit	mění se	85 až 170 HB

Nejměkčí složka v uhlíkových ocelích je ferit, avšak k řezání čisté feritické oceli nastává jen málokdy [3]. Například bainit, který se objevuje i u zkoumaných ocelí, bývá nežádoucí. Taktéž martenzit zhoršuje obrobitelnost. V některých případech ocelí, kde se vyskytují tyto fáze, je možné ocel pouze brousit. V zušlechťeném stavu se můžou vyskytovat další fáze

jako jsou např. sorbit nebo troostit, tyto fáze jsou tvrdší než perlit a působí na obrobitelnost nepříznivě [1].

1.3.4 Vměstky

Na obrobitelnost uhlíkových ocelí má značný podíl způsob dezoxidace jejich tavby. Po dezoxidaci zůstává v oceli určité procento vměstků, ty jsou buď zamýšlené nebo nezamýšlené. Mezi nezamýšlené můžeme zařadit oxidy, písek a sulfid manganu, které se vyskytují na povrchu. Zamýšlené vměstky zlepšují obrobitelnost. Tyto oceli obsahují vysoké procento síry a olova a nazývají se automatové oceli. Jiný typ na zvýšení obrobitelnosti je použití vápníku. Ten vede k nečistotám ve formě oxidů nebo sulfidů přeměněných na hlinitany. Dezoxidační činidla CaSi, která výrazně snižuje otěr, naopak FeSi+Al intenzitu otěru zvyšují. Jako příklad můžeme uvést, že použití CaSi místo FeSi+Al se zvýší stupeň obrobitelnosti ocelí 12 050 až o 3 třídy [1; 3].

1.3.5 Deformační zpevňování

Mnoho materiálu jsou náchylné k nadměrné plastické deformaci v průběhu procesu řezání. Plastická deformace vede k oslabení krystalické struktury z pohledu materiálu tak, že dojde k posunu vzájemných dislokací, pokud je vytvořeno zatížení dostatečné velikosti. Řezné procesy vedou k trvalým změnám ve tvaru obrobku a tím může narůst tvrdost jeho vnějšího povrchu. Mezi nejnáchylnější oceli, které vedou k deformačnímu zpevňování, patří korozivzdorné oceli, duplexní korozivzdorné oceli a oceli s vysokým obsahem manganu [3].

1.3.6 Tvrdost, tvárnost a pevnost

Tvrdost materiálu není měřítkem určení obrobitelnosti. Avšak materiály, kterými jsou si navzájem velmi podobné svými vlastnostmi a složením můžeme posoudit podle tvrdosti, ale není to jediný faktor při určení obrobitelnosti [3].

Pevnost je dalším důležitým faktorem při určení obrobitelnosti, ale také není jediným činitelem podle, kterého lze určit obrobitelnosti. Řezání materiálu s vysokou pevností vyžaduje více energie než řezání materiálu s nízkou pevností [3].

Tvárnost je schopnost materiálu odolávat plastické deformaci, aniž by došlo ke zlomení. U takového materiálu se předpokládá i vysoká pevnost v tahu. Při soustružení nebo vrtání

materiálu, který má vysokou tvárnost se nesnadno dosahuje obvyklým způsobem odlamování třísky [3].

1.3.7 Stav materiálu obrobku

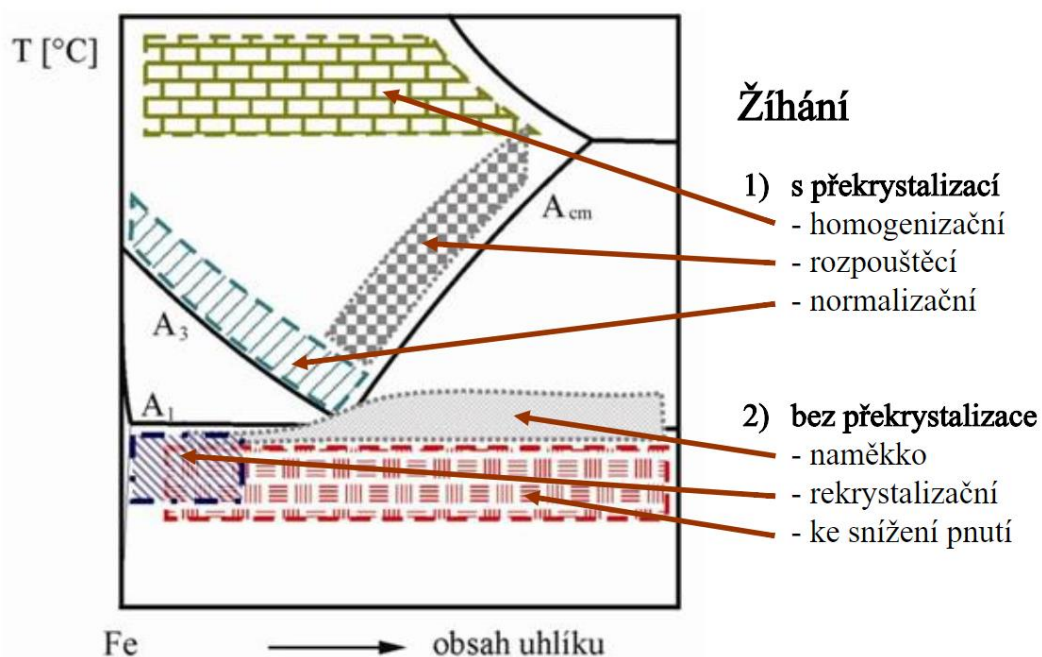
Struktura materiálu obrobku daného složení se může podstatně lišit, v závislosti na výrobním procesu. Nejdůležitějšími činiteli ovlivňující strukturu obrobku jsou deformace, počáteční chlazení a pozdější tepelné zpracování. Materiál může být zpracován jak za tepla, tak i za studena. Za studena je materiál tvrzen deformací, rozsah tvrzení závisí na: typu materiálu, smykové deformaci a teplotě. Pokud teplota během deformace je vyšší než rekrytalizační teplota, potom je materiál zpracováván za tepla, aniž by byl zpevněn deformací [3].

Druhy tepelného zpracování [5]:

- žihání,
- kalení a popouštění,
- termomechanické zpracování,
- povrchové zpracování (povrchové kalení, chemicko-tepelné zpracování).

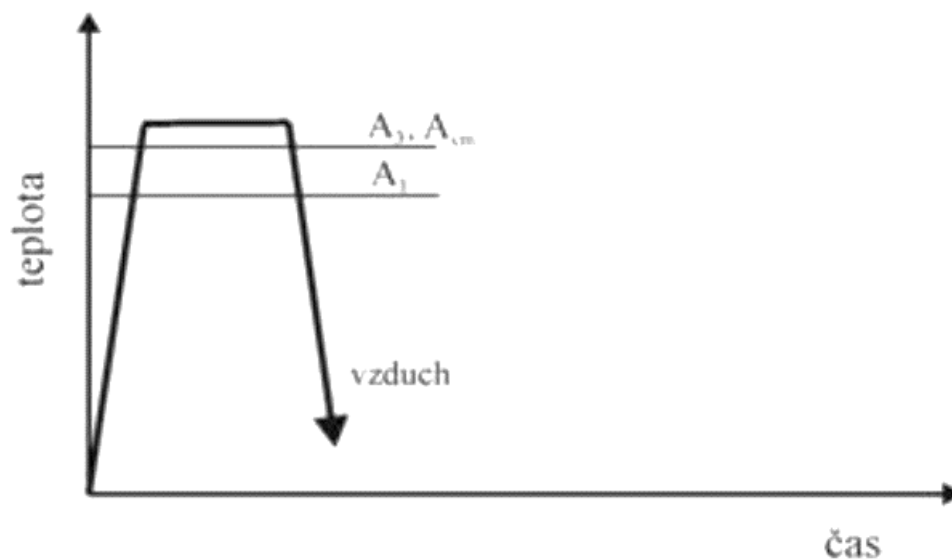
Žihání

Dělíme na bez překrystalizace (rekrytalizační, na odstranění vnitřního pnutí, na měkko) nebo s překrystalizací (rozpouštěcí, normalizační, homogenizační) (viz. obr. 5) [6].



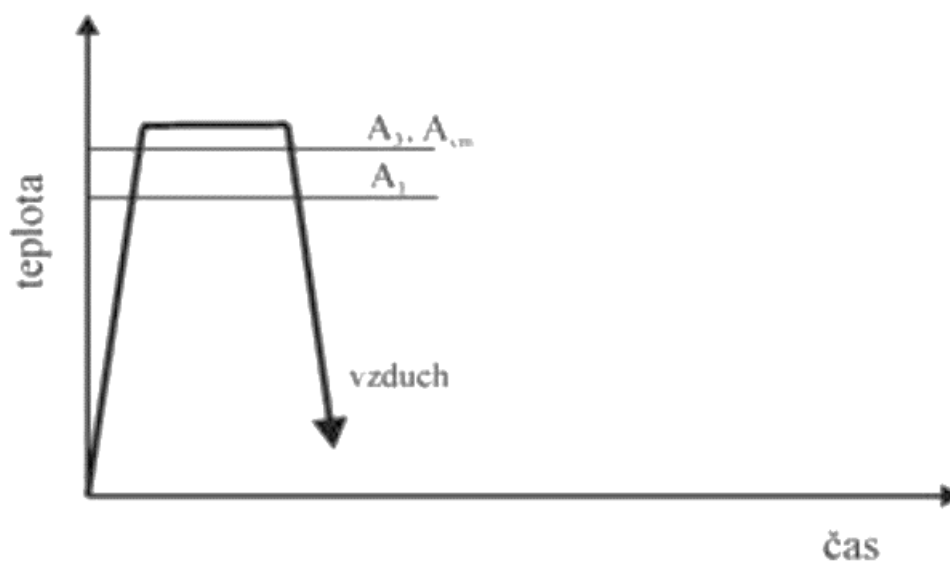
Obr. 5 Rozdělení žihání [5].

- **homogenizační žíhání** – cílem tohoto žíhání je homogenizovat chemické složení. Schéma tepelného zpracování (obr. 6) [5].



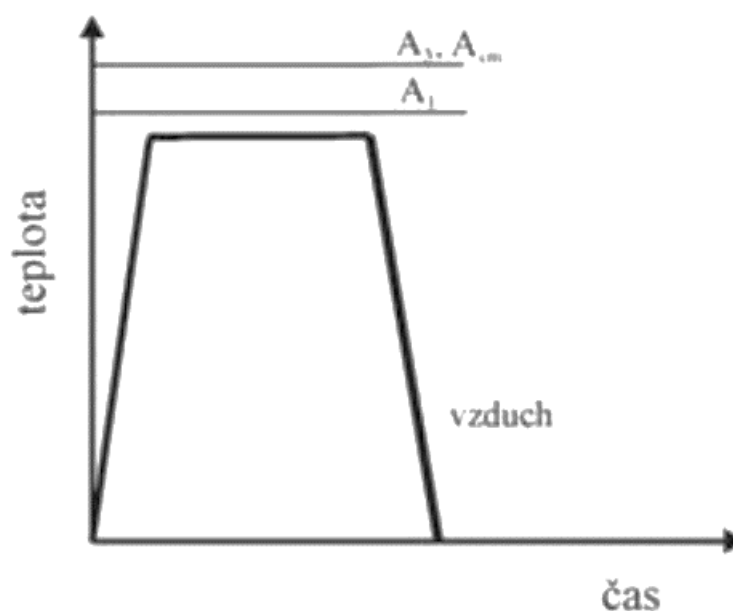
Obr. 6 Homogenizační žíhání [5].

- **normalizační žíhání** – cílem je zjemnit, homogenizovat zhrublou strukturu. Schéma normalizačního žíhání (obr. 7). Normalizační se liší od homogenizačního v teplotě, kterou křivka dosáhne. U homogenizačního žíhání nabývá teplota hodnoty 1050 °C až 1150 °C [5].



Obr. 7 Normalizační žíhání [5].

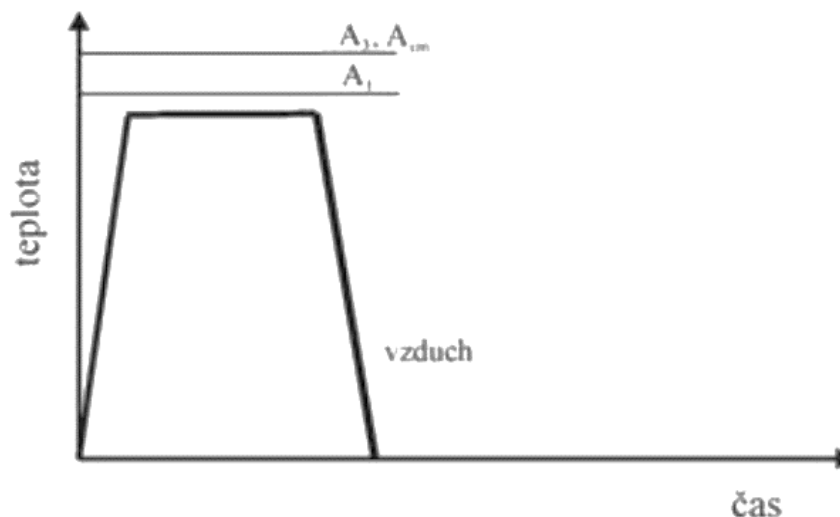
- **rekrytalizační žíhání** – se provádí za účelem obnovení tvárných vlastností po tváření za studena. Schéma rekrytalizačního žíhání (viz obr. 8). Teplota ohřevu se pohybuje okolo 600 °C [6].



Obr. 8 Rekrytalizační žíhání [5].

- **žíhání na měkko** – cílem je zlepšit obrobitelnost. Cementit může mít v oceli dvě formy. Cílem tohoto žíhání je přeměna lamelárního cementitu na globulární. Globule

daleko méně otupují břit. Ohřev se pohybuje v rozmezí 680 °C až 700 °C. Schéma žihání na měkko (viz obr. 9) [6].



Obr. 9 Žihání na měkko [5].

Kalení – se provádí za účelem zvýšení tvrdosti oceli. Principem je přeměna perlitické nebo perliticko feritické struktury na martenzitickou nebo bainitickou. Z tohoto vyplývá, že obsah uhlík v oceli musí být alespoň 0,3 %. Postup kalení je složen z fází ohřevu, prohřátí a ochlazení. Výše ohřívací teploty kalení závisí na požadavku zvýšení tvrdosti materiálu. Ochlazení oceli po ohřevu musí být provedeno dostatečně rychle, aby došlo k přeměně austenitu na martensit [6].

Popouštění – cílem popouštění je snížit její křehkost, která vznikla při martenzitickém kalení. Základem popouštění je částečná přeměna struktury při teplotě 150 °C až 400 °C. Nežádoucím jevem je pokles tvrdosti zakaleného materiálu [6].

Termomechanické zpracování – všeobecný pojem zahrnuje celou řadu procesů. Kombinuje řízené deformační a tepelné zpracování k získání synergických účinků. Jako například zlepšení pevnosti a při to se neztratí houževnatost [7].

Povrchové kalení – povrchové kalení je založeno na velmi rychlém zahřátí povrchu materiálu. Pouze povrch zadané tloušťky dosáhne teploty, která je vhodná pro kalení a po ochlazení se zakalí [6].

Cementace – difúzní sycení povrchu uhlíkem za zvýšené teploty. Cementování se týká ocelí, které obsahují uhlík do 0,2 %. Takové to oceli jsou houževnaté a pro svůj malý obsah uhlíku nekalitelné. Cementací se rozumí celý proces, který je složený z nauhličení materiálu a jeho zakalením. Základní způsoby cementace jsou v prášku dřevěného uhlí, v solné lázni a v plynu [5; 6].

2 VYBRANÉ MATERIÁLY A JEJICH OBROBITELNOST

V každém materiálu se vyskytují jiné prvky, které působí jak kladně, tak záporně na obrobitelnost. V této kapitole byly vybrány určité materiálu, u nich popsány kladné i záporné vlastnosti. Mezi vybrané materiály byly zařazeny materiály, které se používají ve firmě Metaldyne Oslavany, spol. s r.o., uhlíkové oceli, litiny, slitiny hliníku, slitiny hořčíku, slitiny titanu.

2.1 Používané materiály ve firmě

Metaldyne Oslavany, spol. s r.o. se zabývá výrobou drážkových nábojů pro nákladní automobily, tlumičů, hřídelů, tlakových filtrů a dalších výrobků, které jsou především z oceli [8]. Oceli, které jsou používány ve firmě lze zařadit do nízkouhlíkatých s legujícími prvky.

2.1.1 C4C

Chemické složení oceli označení C4C (tab. 4). Mez pevnosti v tahu dosahuje hodnoty 300-470 Mpa [9].

Tab. 4 Chemické složení C4C [9].

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]
0,02-0,06	max. 0,1	0,25-0,4	max. 0,02	max. 0,025	0,02-0,06

2.1.2 16MnCr5

Tento druh můžeme zařadit mezi nízkolegované ušlechtilé mangan-chromové oceli k cementování. Dle ČSN přiřazujeme ocel k třídě 14 220. Ocel se nejčastěji používá pro středně namáhané díly strojů a motorových vozidel. Prokaluje se do hloubky zhruba 30 mm. Při tepelném zpracování je vhodná pro tváření za studena. Ocel je svařitelná. Chemické složení oceli 16MnCr5 (viz tab. 5). Pro dobrou obrobitelnost je výhodná struktura feriticko-perlitická [10].

Tab. 5 Chemické složení 16MnCr5 [10].

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]
0,14-0,19	max. 0,4	1-1,3	max. 0,035	max. 0,035	0,8-1,1

2.1.3 20MnCr5

Nízkolegovaná ušlechtilá ocel mangan-chromová ocel k cementování. Dle ČSN přiřazujeme k ocel k třídě 14 221. Ocel se nejčastěji používá pro středně namáhané díly motorových vozidel a strojní součásti určené k cementování s vyšší pevností v jádře. Ocel 20MnCr5 má oproti 16MnCr5 vyšší prokalitelnost a vyšší pevnost v jádře při nižší houževnatosti. Prokaluje se do hloubky zhruba 40 mm. Chemické složení oceli 20MnCr5 (viz tab. 6) [11].

Tab. 6 Chemické složení 20MnCr5 [11].

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]
0,17-0,22	max. 0,4	1-1,4	max. 0,035	max. 0,035	1-1,3

2.2 Uhlíkové oceli

- **s malým obsahem uhlíku (do 0,15 % C)** – pro svoji tvárnost jsou špatně obrobitelné. Oceli tohoto typu jsou vhodné svařování pro jejich výborné svařitelné vlastnosti. Při obrábění těchto ocelí se tvoří velmi silný nárůstek. Obrobitelná plocha dosahuje vysokých hodnot. Základní strukturní součást je ferit, u kterého se projevují vlastnosti jako houževnatost a měkkost. Problémem u těchto ocelí bývá kvalita obrobené plochy a dělení třísky [1; 12].
- **nízkouhlíkaté oceli s obsahem uhlíku < 0,3 %** – případ, kdy je perlit rovnoměrně rozložený mezi zrna feritu a je lamelární, má na obrobitelnost kladné výsledky a tyto oceli se obrábějí lépe. Naopak pokud je perlit zrnitý, tak to pro obrobitelnost není vhodné. Zhoršuje se kvalita povrchu, díky nárůstku na břit [1].
- **oceli s vyšším obsahem uhlíku 0,3-0,5 % C** – z pohledu obrábění je výhodná struktura v podobě globulárního perlitu s většími zrna cementitu. Této struktury dosáhneme normalizačním žháním a tím se zlepší obrobitelnost. Čím méně je v oceli uhlíku tím vyšší by měla být teplota žhání (okolo 950 °C) [1].
- **oceli s obsahem uhlíku nad 0,5 %** – tyto oceli je vhodné žíhat na měkko. Tímto způsobem vznikne globulární perlit. Tento perlit má nižší abrazivní účinek oproti lamelárnímu perlitu (tzv. destičková forma) [1].
- **legované oceli** – obsah legujících prvků má značný vliv na obrobitelnost v těchto ocelí. Např. legující prvky Cr, Ni, Mo, V, Co ve většině případů zvyšují pevnost a některé i houževnatost, což jsou negativní jevy, které působí na obrobitelnost.

Legující prvky vytváří také různé sloučeniny jako například karbidy, které zhoršují obrobitelnost. Dalšími prvky, které mají negativní vliv na obrobitelnost, jsou Mn (zvyšuje pevnost), Si (zvyšuje brusný otěr) a Ni (do 2 % nemá vliv, ale nad 2 % houževnatost) [1].

2.3 Litiny

Největší vliv na obrobitelnosti litin má chemické složení, způsob výroby a struktura. U všech druhů litin hraje nejdůležitější roli uhlík a jeho forma. Uhlík je ve formě grafitu u většiny šedých litin. Grafit má příznivý vliv na obrobitelnost, čím větší jsou rozměry a počet částic, tím lépe se litina obrábí. Křemík (optimálně 2,5 % až 2,7 %) způsobuje grafitizaci uhlíku, proto jeho vliv na obrobitelnost je prospěšná. Fosfor ve struktuře působí negativně na obrobitelnost z důvodu brusného účinku. Síra a mangan zlepšují obrobitelnost. Mangan je ve struktuře obsažen ve formě siřníku manganatého, který je rozptýlen ve feritu. Nad 0,8 % však působí negativně na obrobitelnost. Nikl podporuje grafitizaci volných karbidů a tím zhoršuje (při obsahu 10 % až 20%) obrobitelnost. Při obsahu 2 % má na obrobitelnost pozitivní vliv díky tomu, že způsobuje stejno měrnost struktury. Chrom vytváří ve struktuře karbidy a tím zhoršuje obrobitelnost. Wolfram a vanad mají stejný účinek na obrobitelnost jako chrom [1; 13].

V mikrostruktuře je grafit dobře obrobitelný a z hlediska trvanlivosti břitu má pozitivní vliv. Naopak ferit ve struktuře způsobuje ulpívání třísek na břitu z důvodu jeho vlastností jako například měkkost a vysoká tažnost. Struktura perlitická zhoršuje obrobitelnost, obdobně jako u ocelí je zde výhodná struktura s globulárním perlitem. Lamelární perlit dostaneme, pomocí sferoidizace na perlit globulární [1].

- **bílá litina** – je špatně obrobitelná z důvodu obsahu cementitu a perlitu ve struktuře. V rozích odlitků při frézování dochází k praskání. Bílou litinu s prvky jako jsou například nikl, mangan, chrom a vyšším obsahem uhlíku lze pouze brousit. Její tvrdost dosahuje 50 až 62 HRC [1; 3].
- **tvárná litina** – dosahuje tvrdost přibližně 135 až 430 HB při porovnání s ocelí o stejné tvrdosti je však hůře obrobitelná z důvodu nižší tepelné vodivosti. Tvárná litina v porovnání například se šedou má nižší stupeň obrobitelnosti. Při obrábění vzniká delší tříska a řezná rychlost je zhruba o čtvrtinu nižší než u šedé. Při volbě

řezného nástroje je nejlepší volbou slinutý karbid, naopak tvárná litina nemůže být obráběna PKBN [1; 3].

- **šedá litina** – její tvrdost se pohybuje v rozmezí 100 až 260 HB. Všeobecně je šedá litina dobře obrobitelná, její tříska je jednoduššího charakteru. Například i délka uskladnění má značný podíl na její obrobitelnosti, proto znalost chemického složení nezaručuje přesné určení její obrobitelnosti [1; 3].

2.4 Slitiny hliníku

Chemické složení, způsob zpracování polotovaru (například slévání, tažení a kování) má značný podíl na obrobitelnosti, u některých druhů slitin také tepelné zpracování. Čistý hliník je nesnadno obrobitelný pro jeho vlastnosti (tvárnost a ulpívání na řezném nástroji), avšak jeho slitiny jsou za běžných podmínek snadno obrobitelné. Mezi legující prvky, které zlepšují obrobitelnost můžeme zařadit hliník, hořčík, měď, zinek, mangan, vizmut, chrom. Naopak zhoršující obrobitelnost zapříčiňuje křemík [1; 3]. Slitiny hliníku můžeme rozdělit z hlediska chemického složení do tří skupin [1]:

- **nejlépe obrobitelné** – Al + Cu, Al + Mg, Al + Cu + Mg (tzv. duraly), Al + Cu + Zn + Mn (tzv. super duraly)
- **obrobitelné** – Al + Si, Al + Si + Cu (Si <5%)
- **těžko obrobitelné** – Al + Si (obsah Si až 12 %), slitiny s přísadou Ni, Fe, Mn, Co, Cu, Mg

2.5 Slitiny hořčíku

Magnesium (hořčík) můžeme zařadit do kategorie dobře obrobitelných. V porovnání s ostatními materiály hodnoty úběry mohou být vyšší a pracovní příkon nižší. Obrobený povrch dosahuje malých hodnot. Hořčík adhezivně neulpívá na břítu, tudíž i životnost nástrojů je velice dlouhá. Hořčík má vysoký součinitel tepelné roztažnosti $27,2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Snadnost a rychlost hrají hlavní roli při rozhodování použití materiálu. Mezi nebezpečné jevy se řadí vzplanutí při obrábění. Při rozhodování může rozhodnout problém s korozi. Avšak v dnešní době jsou různé úpravy, které zabrání korozi [1].

2.6 Slitiny titanu

Slitiny titanu se používají především v leteckém průmyslu pro svoji pevnost, která je ke své hustotě výrazným pozitivem. Mezi pozitivní vlastnosti se řadí i odolnost vůči korozi, proto jsou dále využívány v lodním a chemickém průmyslu. Zastoupení se nachází i v lékařské sféře, kde se ze slitin titanu zhotovují například implantáty pro kolena, čelisti a kyčle. Existují tři typy titanových slitin (α -, $\alpha+\beta$ -, β -). Čistý titan je špatně obrobitelný. Čím více titanové slitiny obsahují legující prvky, tím hůře jsou obrobitelné. Mezi negativní vlastnosti patří nízká tepelná vodivost. Titan vykazuje silnou chemickou reaktivitu, to může vést k hromadění vrstev titanu nebo jeho slitin na povrchu břitu a tím se může zhoršit kvalita povrchu a ta vede ke zhoršení únavových vlastností materiálu. Při řezání titanových slitin se používají řezné nástroje ze slinutých karbidů, které mají ostré břity [3].

3 ZHOTOVENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Zhotovení proběhlo v několika dnech ve firmě Metaldyne spol. s.r.o., která sídlí v Oslavenech. Konkrétně se jednalo o zhotovení vzorků po tepelném zpracování. Pro vyhodnocení vzorků byly zhotoveny 4 stavy:

- přírodní stav (+U),
- přírodní stav, který byl vyžihán měkce (+U + AC),
- přírodní stav, který byl vyžihán normalizačně (+U +N),
- Přírodní stav, který byl vyžihán normalizačně a potom ještě na měkko (+U +N +AC).

Pro zhotovení vzorků byly použity tyče kruhové loupáné Ø 28 mm a Ø 40 mm. Kruhové tyče jsou dodávány od Třineckých železáren, a.s., ke každé tavbě byl dodán inspekční certifikát, který obsahuje základní údaje o konkrétní tavbě.

- **tyč kruhová loupáná Ø 28 mm**

Označení: 16MnCr5

Chemické složení (viz tab. 7):

Tab. 7 Chemické složení [%] 16MnCr5.

C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	H	N	Mo	Sn
0,18	1,11	0,19	0,015	0,020	0,02	1,08	0,03	0,030	0,90	0,012	0,033	0,002

Tvrдост: 182 HB až 190 HB

- **tyč kruhová loupáná Ø40 mm**

Označení: 16MnCrS5, rozdíl od označení 16MnCr5 je v dodržení obsahu síry. U 16MnCrS5 musí být síra obsažena v rozmezí 0,020 % až 0,040 %, u 16MnCr5 síra musí být do 0,035 % u tohoto typu se tedy vůbec nemusí vyskytovat [14].

Chemické složení (tab. 8):

Tab. 8 Chemické složení [%] 16MnCrS5.

C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	H	N	Mo	Sn
0,17	1,16	0,20	0,016	0,022	0,05	1,07	0,05	0,030	1	0,0119	0,030	0,004

Tvrдост: 168 HB až 178 HB

3.1 Tepelné zpracování

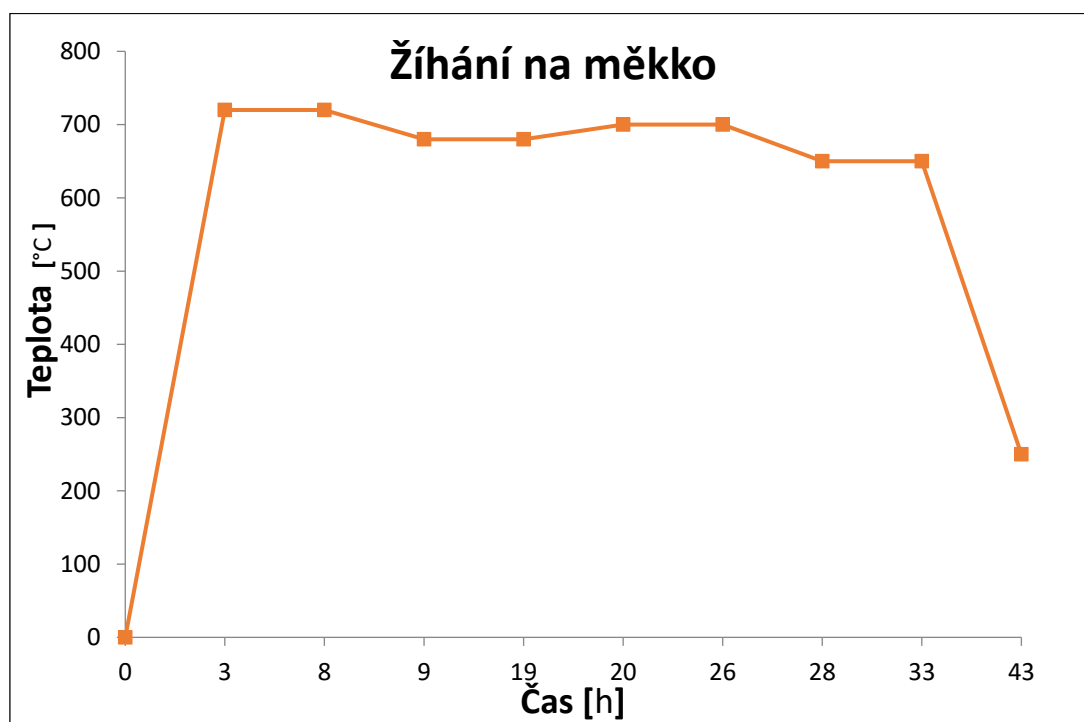
Tepelná úprava proběhla v peci značky LAC (obr. 10).



Obr. 10 Pec značky LAC.

3.1.1 Žíhání na měkko

Cílem žíhání na měkko bylo přeměnění lamelárního cementitu na globulární. Pro žíhání na měkko byl zvolen tzv. schodovitý program (viz obr. 11).



Obr. 11 Grafické znázornění žíhání na měkko.

3.1.2 Normalizační žihání

Cílem normalizačního žihání je cílem je zjemnit, homogenizovat zhrublou strukturu. Schéma normalizačního žihání pro zkoumaný vzorek (obr. 12).



Obr. 12 Grafické znázornění normalizačního žihání.

Křivka popisující teplotu zkoumaného vzorku má světle modrou barvu. Ostatní křivky odpovídají například teplotě vyzdívky apod.

3.2 Zkouška tvrdost

Vzorky byly rozříznuty v podélném směru o šířce 12 mm. Tyto vzorky byly vyhotoveny na metalografické pile značky Struers-Dicotom 6 (viz obr. 13).

Použitý kotouč 20A25, řezná rychlost 0,5 mm/s.



Obr. 13 Metalografická pila [15].

Zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 6506. Indentor je kulička o různých průměru. Pro měření byla použita kulička ze slinutého karbidu o průměru 2,5 mm. Označení HBW 2,5/187,5 znamená, že byla použita kulička o průměru 2,5 mm a zatížení v kg 187,5. Vzorek byl umístěn na tuhou podpěru. Na povrchu se nesmí nacházet nečistoty ve formě okují apod. Kulička je do materiálu vtlačována kolmo k jeho povrchu. Náběh zatížení z nuly do jeho plného zatížení musí být v rozmezí od 2 s až 8 s. Doba zatížení pak musí být od 10 s do 15 s. Na zkoušeném vzorku byly zhotoveny 4 vtisky (dva na okraji a dva na středu) (viz obr. 14) [16].



Obr. 14 Ukázka vtisků.

Nejmenší tloušťka vzorku musí být nejméně desetinásobek hloubky vtisku, díky plastické deformaci, kterou chceme, aby vznikla pouze ve zkoušeném materiálu. Vtisky musí od sebe být vzdáleny nejméně $4 \cdot d$ a vzdálenost od okraje musí splňovat vzdálenost $2,5 \cdot d$. Při tom d je průměr vniknuté kuličky. Měření je nutno provést za teploty od 10 °C až 35 °C. Měření v laboratoři ve firmě Metaldyne spol. s.r.o. bylo provedeno za teploty 20 °C [16].

Měření se provedlo na tvrdoměru (viz obr. 15), kde se z matrice odečetl průměr vtisku, který se poté otočil o 90° a znova se změřil průměr. Z aritmetického průměru se poté odečetla z tabulky pro určení tvrdosti podle Brinella dle ČSN EN ISO 6506-1.



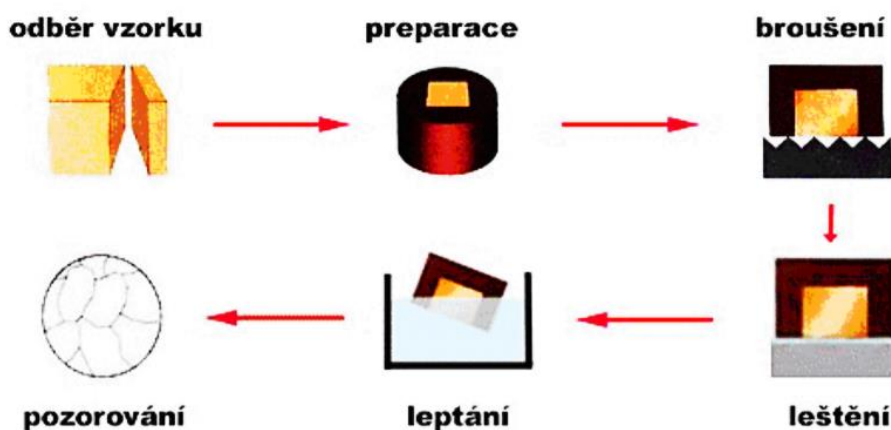
Obr. 15 Tvrdoměr

3.3 Mikrostruktura

Postup přípravy vzorku pro pozorování se skládá z několika kroků (obr. 16) [17]:

- odběr vzorku,

- preparace vzorku,
- broušení,
- leštění,
- leptání.



Obr. 16 Příprava vzorku [17].

- **Odběr vzorku** – vzorek byl odebrán pro měření tvrdosti. Byly použity stejné vzorky, které se dále upravily podle dalších kroků.
- **Preparace vzorku** – vzorky se zalily do formy.
Sloučením clarocitu powder + clarocit liquid vznikla tzv. medová konzistence, která následně ztuhla.



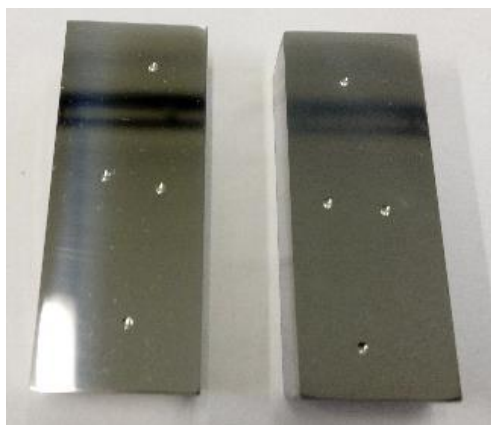
Obr. 17 Preparace vzorku.

- **Broušení** – vzorek je broušen ve dvou směrech na sebe kolmých. Broušení se provedlo pomocí tří brousících papírů. Začíná se od nejhrubšího po nejemnější. Byly použity brusné papíry s označení P240, P600, P1200. Před každou výměnou brousícího papíru je důležitý oplach, který byl proveden pomocí vody a poté lihu. Broušení, stejně jako leštění bylo provedeno na Saphir 360 (obr. 18).



Obr. 18 Saphir 360.

- **Leštění** – Pasta byla použita Diamantsuspension Polykrystallin 3 μ m + smáčidlo na bázi lihu.
- **Leptání** – za pomoci HNO_3 3 %. Vzorek byl ponořen do sloučeniny tří procentní sloučeniny HNO_3 na cca 3 s. Po leptání zmatný povrch (obr. 19).



Obr. 19 Rozdíl před a po leptání.

3.4 Soustružení

Soustružení bylo provedeno na dvou různých strojích. První soustruh s označením TUM 25B (viz. obr. 20) a druhé CNC Haas SL 40 (viz. obr. 21).



Obr. 20 Soustruh TUM 25B.



Obr. 21 Haas SL 40 [18].

Na soustruhu byly použit řezný nástroj ze slinutého karbidu s označením S20. Na obráběcím centru Haas Sl 40 byla použita břitová destička WNMG 08 04 12-XM 4325. Řezné parametry byly nastaveny následovně:

Tab. 9 Řezné parametry.

f	ap	n	L
0,2 mm	2 mm	560 min ⁻¹	55 mm

Řezná rychlost byla vypočtena ze vztahu (2) [1]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2)$$
$$v_c = \frac{\pi \cdot 40 \cdot 560}{1000} = 70,3 \text{ m/min}$$
$$v_c = \frac{\pi \cdot 20 \cdot 560}{1000} = 35,2 \text{ m/min}$$

Vzorky o průměru 40 mm a 28 mm byly upnuty pomocí sklíčidla.

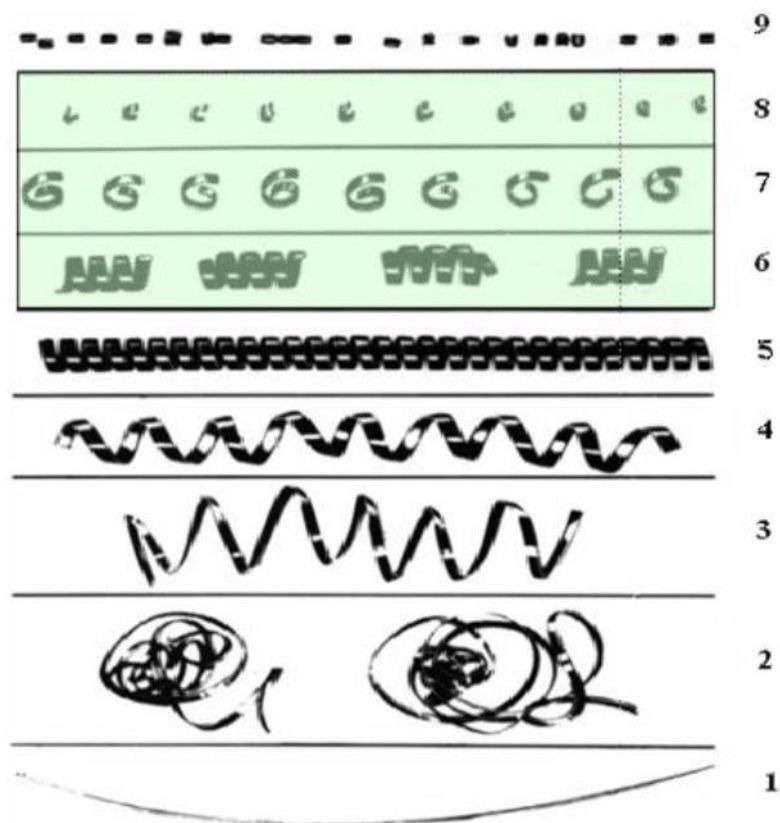
4 VYHODNOCENÍ VZORKŮ

V této kapitole bude porovnání a vyhodnocení všech experimentů, které byly provedeny. U soustružení porovnám jednotlivé tvary třísek. Dále byla vyhodnocena tvrdost podle Brinella. Bude popsána mikrostruktura jednotlivých u každého tepelného zpracování. U vzorku průměru 40 byla vyhodnocena mikročistota.

4.1 Soustružení

V podkapitole budou porovnány tvary třísek podle obr. 22. Tvar třísky závisí na několika faktorech [1]:

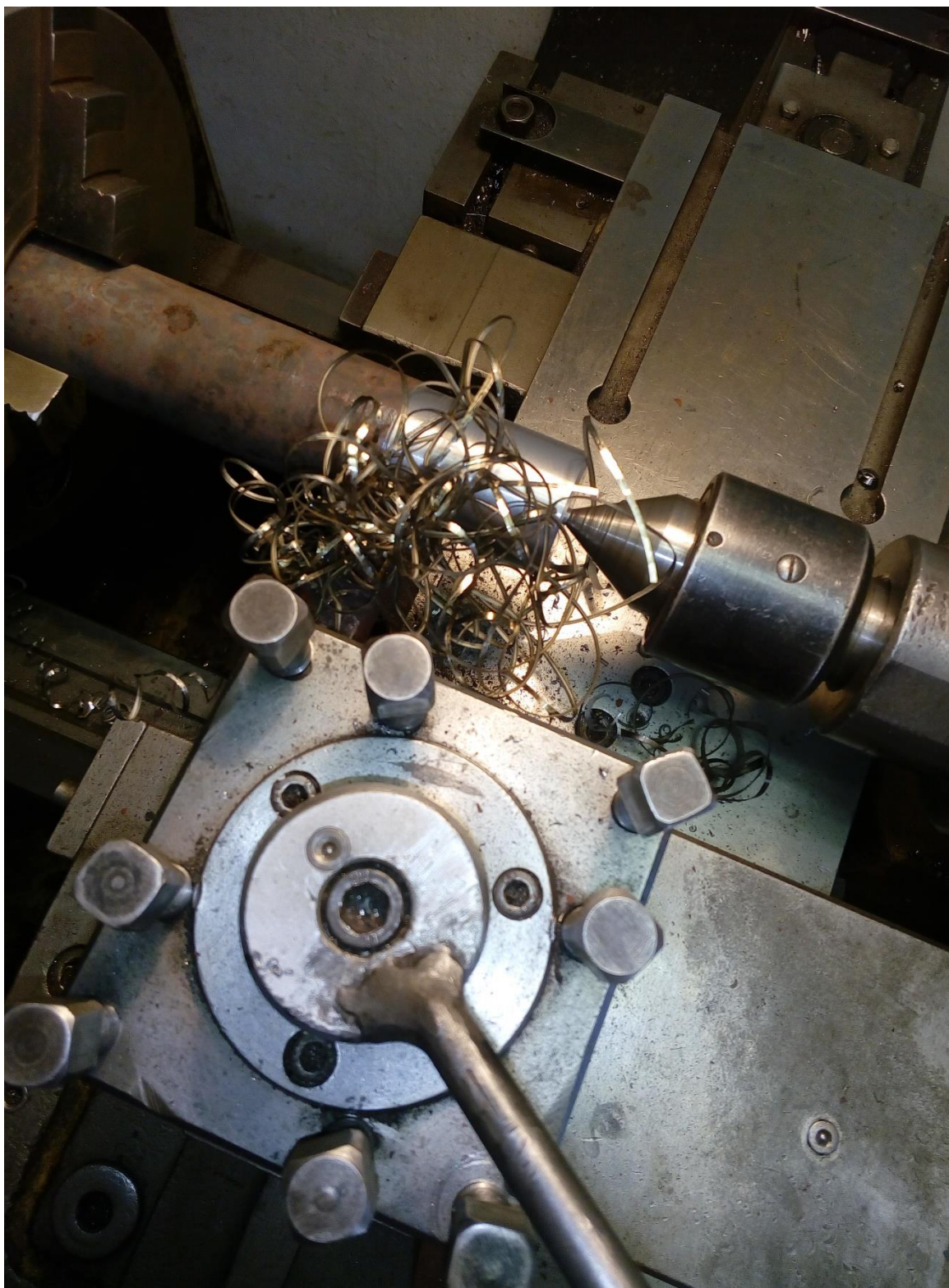
- vlastnosti materiálu, který je obráběn,
- geometrie řezného nástroje,
- řezné podmínky.



Obr. 22 Tvary jednotlivých třísek [1]: 1 - stužková, 2. Stužková svinutá, 3. Stužková vinutá, 4. Vinutá dlouhá volně, 5. Vinutá dlouhá těsně, 6. Vinutá krátká, 7. Obloukovitá, 8. Článekovitá, 9. Elementární

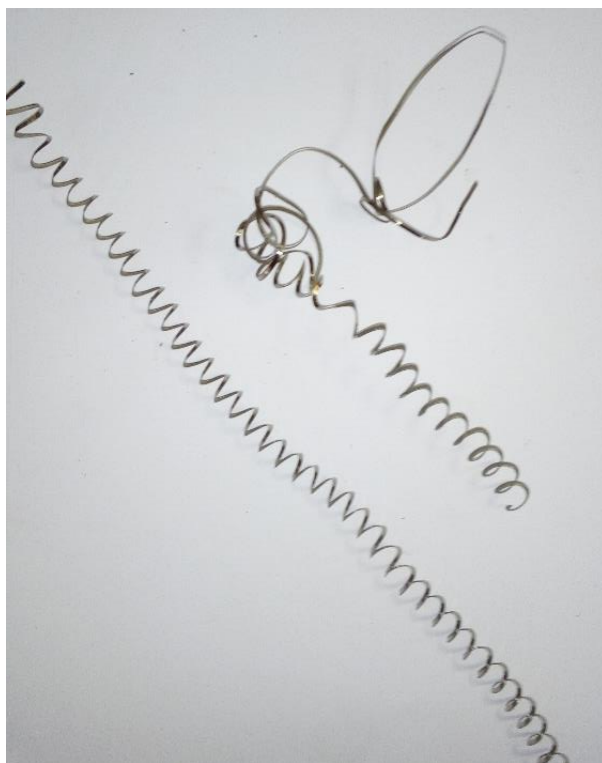
1-5 jsou nevyhovující tvary třísek, 6-9 vyhovující tvary, 9- třísky přetvářené

Nejhůře se obráběl stav +U +AC Ø 40 mm. Tříška se navinula a soustruh musel být zastaven (viz. obr. 23). U Ø 40 mm byl použit řezný nástroj ze SK typu S20.



Obr. 23 Přerušení obrábění.

- $\varnothing 40 \text{ mm} + \text{U}$ – tvar třísky stužková vinutá, která je nevyhovující (obr. 24).



Obr. 24 Stužková vinutá.

- $\varnothing 40 \text{ mm} + \text{U} + \text{N}$ – tvar třísky vinutá dlouhá volně, která je nevyhovující (obr. 25).



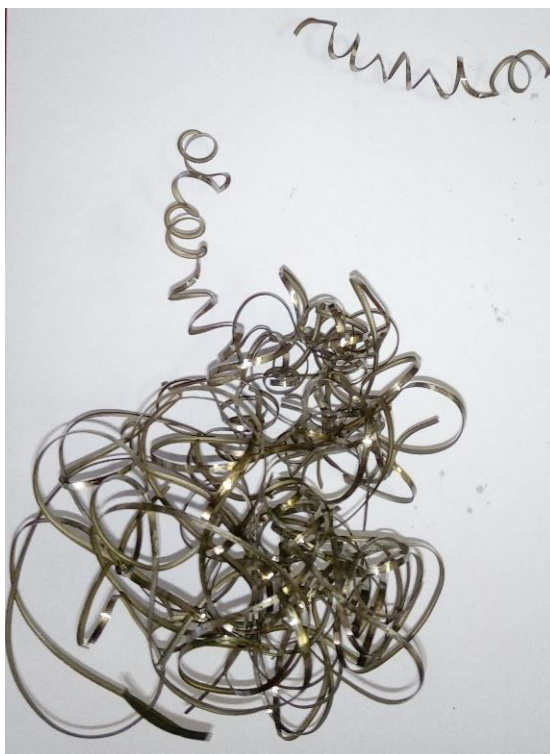
Obr. 25 Vinutá dlouhá volně.

- **Ø 40 mm +U +N – tvar třísky stužková svinutá, která je nevyhovující (obr. 26).**



Obr. 26 Stužková svinutá.

- **Ø 40 mm +U +N +AC- tvar třísky stužková svinutá, která je nevyhovující (viz. Obr. 27).**



Obr. 27 Stužková svinutá.

Mezi jednotlivými tvary třísek byly jen nepatrné rozdíly, z toho vyplývá, že největší vliv na obrobiteľnosť má rezný nástroj. Preto bol vymenený rezný nástroj na Ø 26 mm. Typ rezného nástroje pro Ø 26 mm byla zvolena břitová destička WNMG 08 04 12-XM 4325. Pro všechny stavy byly vyhodnoceny tvary třísek stejné. Z tohoto důvodu zde je uveden pouze jeden z nich (obr. 28). Tvar této třísky byl vyhodnocen jako vyhovující a článkovitého.



Obr. 28 článková tríska pro průměr 28 pro všechny stavy

4.2 Tvrdost

Tvrdost podle Brinella byla naměřena na čtyřech stavech. Byly zhotoveny 4 vtisky, dva na okraji a dva ve středu. Jednotlivé tvrdosti byly zaneseny do tab. 10 a tab. 11.

Tab. 10 Tvrdost u jednotlivých tepelně zpracovaných vzorků s průměrem 40 mm.

	+U		+U +AC		+U +N		+U +N +AC	
	střed	okraj	střed	okraj	střed	okraj	střed	okraj
HB	167,	164,	131,	138,	138,	140,	127,	131,
	170	177	133	138	135	143	127	131

Tab. 11 Tvrdost u jednotlivých tepelně zpracovaných vzorků s průměrem 28 mm.

	+U		+U +AC		+U +N		+U +N +AC	
	střed	okraj	střed	okraj	střed	okraj	střed	okraj
HB	184,	195,	135,	143,	131,	135,	127,	129,
	187	187	135	143	129	133	127	129

Z tab. 10 a tab. 11 lze vyčíst, že nejlépe se obráběl stav +U +N +AC u \varnothing 28 mm, který dosahuje nejmenších hodnot tvrdosti 127 HB. Naopak nejhůře se obráběl \varnothing 28 mm stav +U, který dosahuje hodnot až 195 HB. Podle naměřených hodnot je jasné že žihání snižuje tvrdost a tím zlepšuje obrobiteľnosť.

4.3 Mikrostruktura

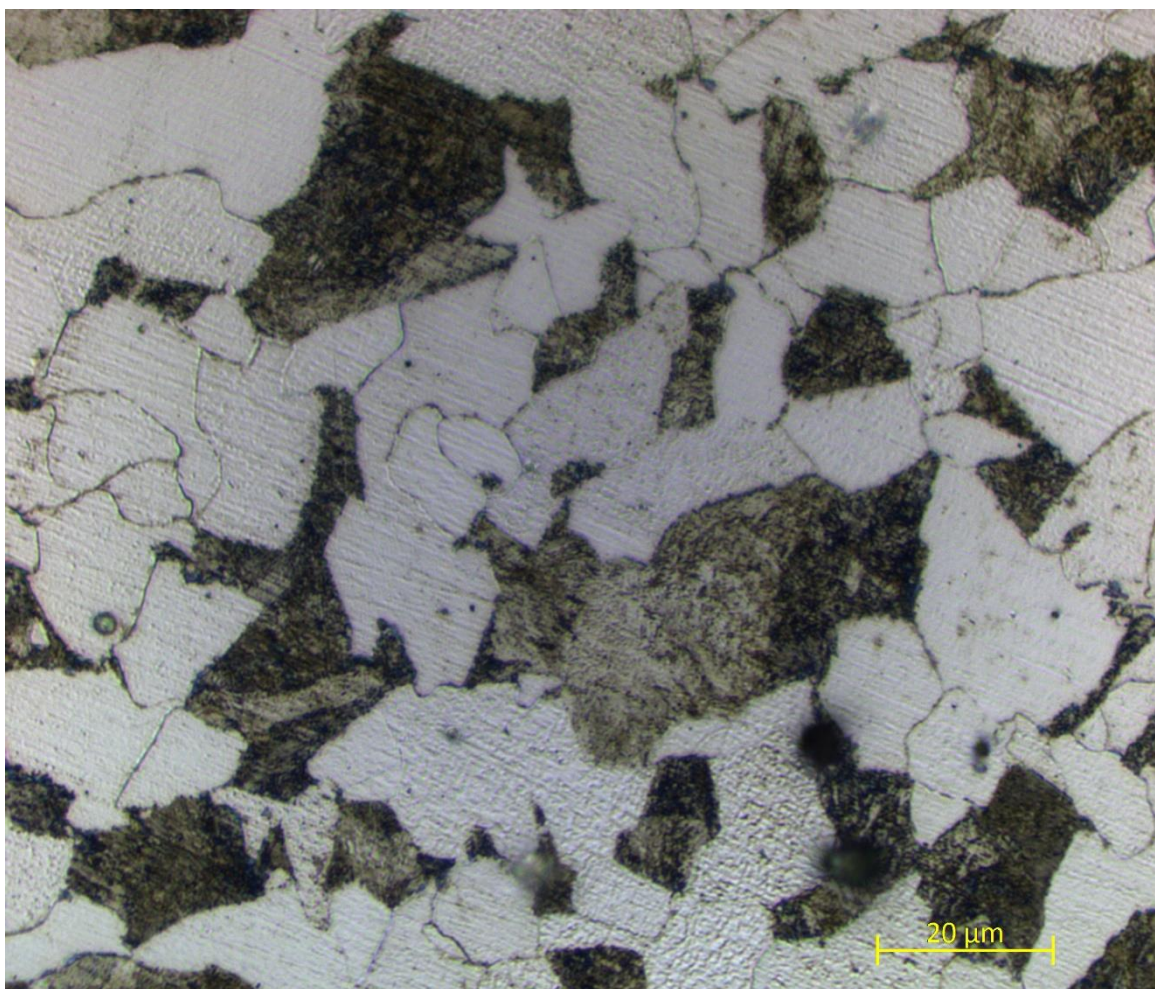
Mikrostruktura byla vyhodnocena pomocí mikroskopu AXIO (obr. 29).



Obr. 29 Mikroskop AXIO.

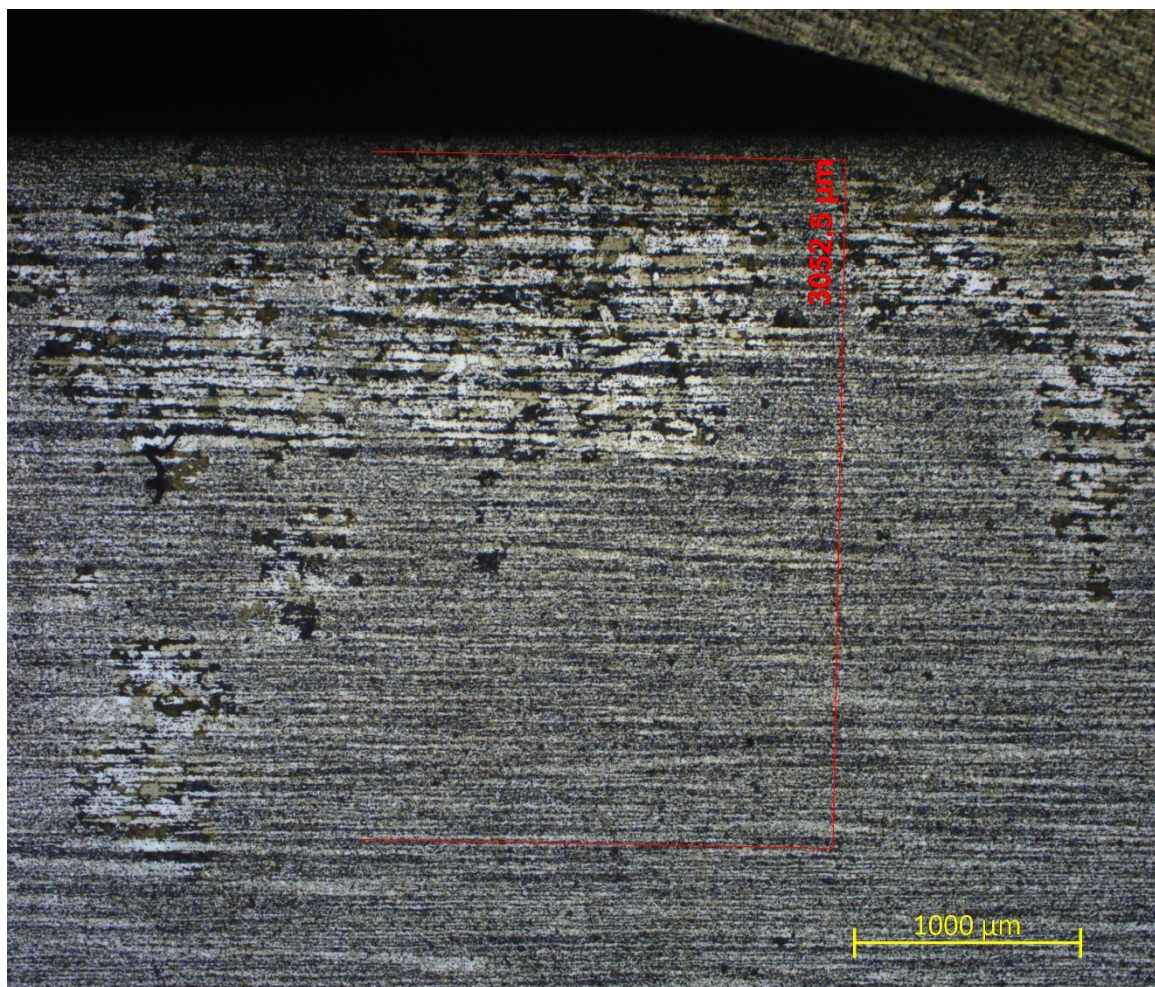
Pořízené snímky jsou ve zvětšení 1000×, 500×, 200×, 100×, 25×. Velikost zrna je porovnána s etalonem podle ASTM E 112. Struktura je u všech stavů stejná feriticko-perlitická. Ferit je vyobrazen jako bílá matrice a perlit je tvořen cementitem a feritem. Cementit je vyloučen ve formě globulí nebo lamel.

- **Ø 40 mm +U** – feriticko perlitická struktura s vyloučeným lamelárním cementitem. Velikost feritického zrna 45 µm. Při přiblížení 1000× se ve struktuře vyskytuje bainit, který vzniká při rychlém ochlazování. Je ve formě jehliček a ve struktuře je nežádoucí (obr. 30).



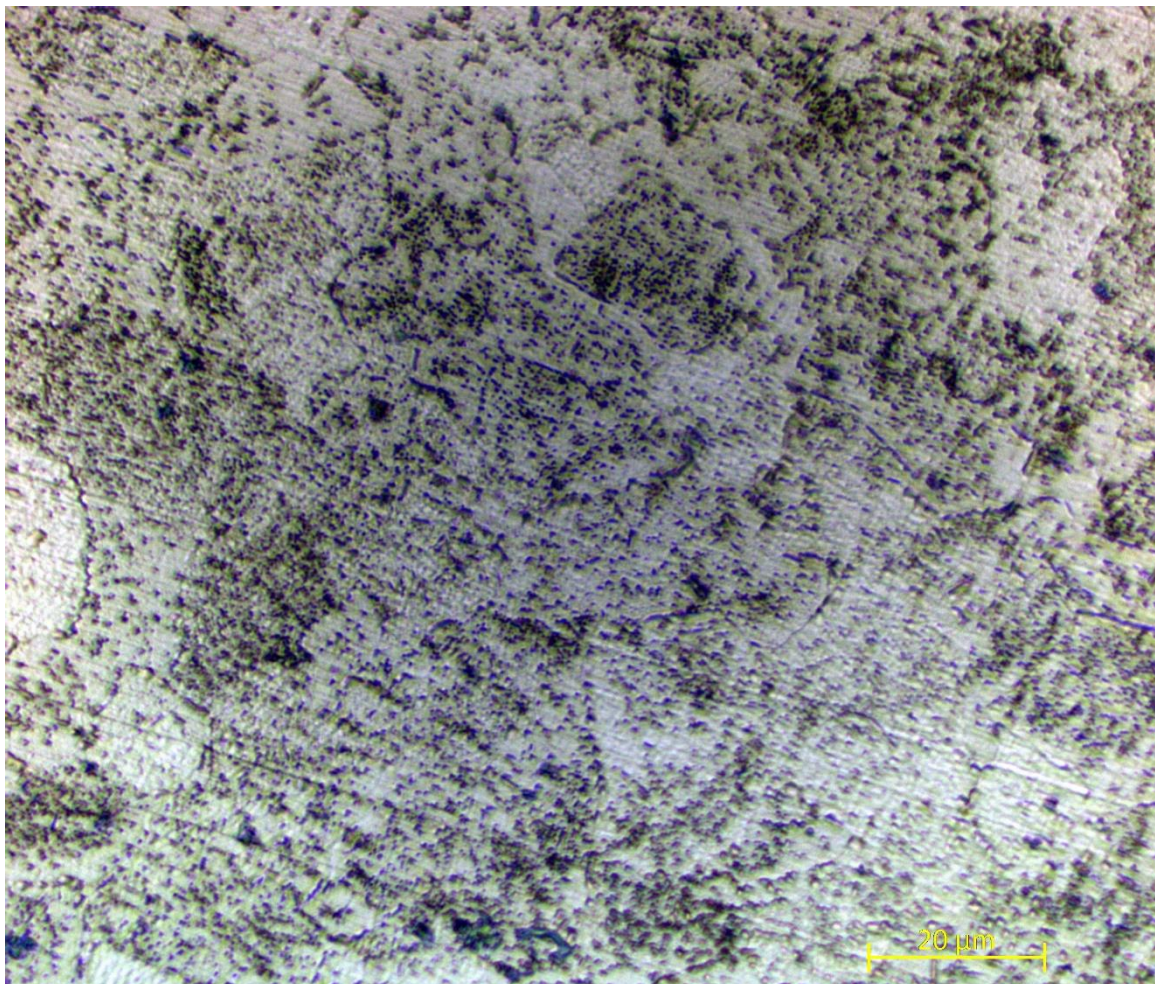
Obr. 30 zvětšení 1000× u Ø 40 +U.

- **Ø 40 mm +U +N** – feriticko-perlitická struktura s vyloučeným lamaelárním cementitem. Částečně nehomogenní struktura cca 3,1 mm od okraje. Velikost zrna 25 μm . V nehomogenní struktuře dosahují zrna až 70 μm . Nehomogenní struktura vznikla kvůli rychlému ochlazení (viz obr. 31).



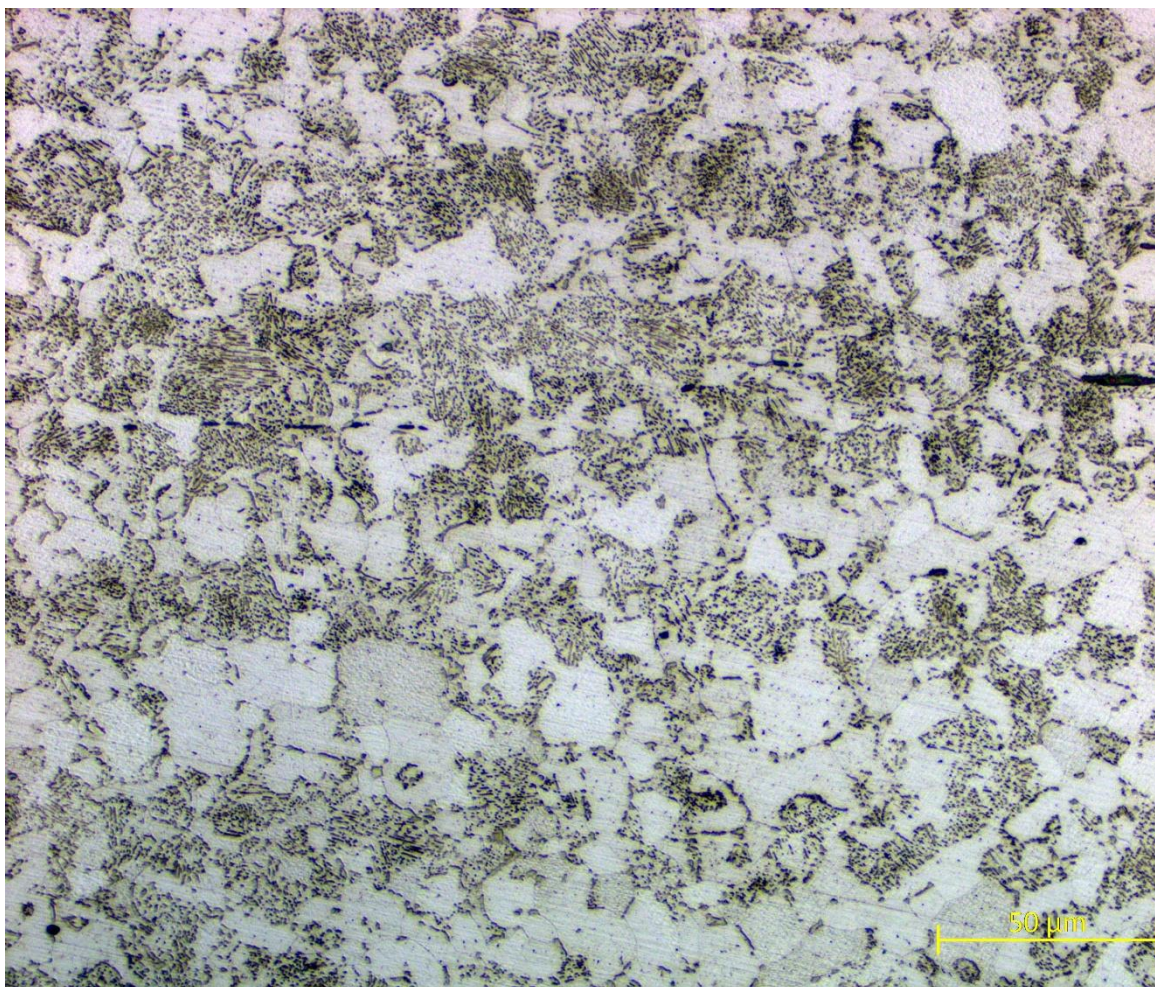
Obr. 31 Nehomogenní struktura u vzorku Ø 40 mm +U +N.

- **Ø 40 mm +U +AC** – feriticko-perlitická struktura s vyloučeným globulárním cementitem. Velikost feritického zrna 50 μm (viz obr. 32).



Obr. 32 Přeměna cementitu při zvětšení 1000 \times .

- **Ø40 +U +N +AC** – feriticko-perlitická struktura s vyloučeným globulárním a lamelárním cementitem (viz obr. 33). Velikost feritického zrna 40 μm .



Obr. 33 Globulární (60%) a lamelární (40%) cementit.

4.4 Mikročistota

Zde můžeme vidět sulfidy, které jsou zobrazeny pomocí tenkých čar. Oxidy, které jsou vyobrazeny jako černé tečky. Vzorky nebyly leptány, byly pouze vyleštěny (viz obr. 34).



Obr. 34 Mikročistota při zvětšení 100×.

5 DISKUZE

Bakalářská práce má ve svém názvu povrchové úpravy, které se bohužel vzhledem k časové vytíženosti linky na povrchové úpravy nepodařilo uskutečnit. V následné diskuzi jsou probrány některé poznatky a závěry, které vznikly během tvorby experimentální části práce.

5.1 vysvětlení pojmů

Pojmem „vada“ jsou v práci myšlené ty faktory, které negativně ovlivňují obrobitelnost daného materiálu.

5.2 vzniknuté problémy

V praktické části práce se vyskytly problémy při tepelném zpracování, konkrétně při žíhání na měkko, které se muselo opakovat v důsledku nežádoucího vyloučení cementitu ve stavu +AC. Při žíhání na měkko a normalizačním žíhání došlo k nežádoucímu vyloučení cementitu v 60 % ve formě lamel a ve 40 % ve formě globulí. Bylo očekáváno, že cementit bude vyloučen ve formě globulí zhruba 60 % a ve formě lamel zhruba 40 %. Z tohoto důvodu byl upraven program žíhací pece a tepelné zpracování na program do tzv. schodovitého tvaru, který zaručil požadovanou strukturu.

5.3 negativní jevy ve struktuře

U vzorku Ø 40 mm +U se ve struktuře vyskytnul nežádoucí bainit, který vzniknul rychlým ochlazováním polotovaru. Dalším negativní jev byl pozorován u vzorku Ø 40 mm +U +N, kde se vytvořila se nehomogenní struktura cca 3,1 mm od okraje.

ZÁVĚR

Bakalářská práce byla rozdělena do pěti hlavních kapitol, z nichž první dvě byly teoretického charakteru, ve kterých byla přiblížena problematika obrobitelnosti. Ve druhé kapitole byly vybrány materiály a u nich popsány negativní jevy, které působí na jejich obrobitelnost. Praktická část je přiblížena ve třetí a čtvrté kapitole, a zabývá se zhotovením vzorků a provedení experimentů. Vzorky byly použity z tyče kruhové loupáné, materiál těchto tyčí byl 16MnCr5. U těchto tyčí byly provedeny tyto operace:

- zhotovení 4 stavů: přírodní, vyžíhaný měkce, vyžíhaný normalizačně a vyžíhaný nejdříve normalizačně a poté ještě měkce,
- vyhodnocení mikrostruktury,
- zkouška tvrdosti,
- porovnání tvaru třísek.

Ze získaných výstupů vyplývají základní rozdíly jak v tvrdosti, tak v mikrostruktuře jednotlivých stavů. Jako nejvýhodnější stav z hlediska obrobitelnosti se ukázalo kombinované tepelné zpracování, tedy vyžíhaný normalizačně s následným žíháním na měkko.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] FOREJT, M. a M. PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [2] ČEP, R. a J. PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění*: ISBN: 978-80-248-2533-5. [online]. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011 [cit. 2018-04-29].
Dostupné z:
projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrazeni.pdf
- [3] DE VOS, P. *Obrábění kovů: teorie v praxi*. Lund: Division of Production and Materials Engineering, Lund University, 2014.
- [4] Bogner Edelstahl. *Obrobitelnost*. [online]. b.r. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z:
<http://www.bogner.cz/files/files/Obrobitelnost.pdf>
- [5] VĚCHET, S. a K. NĚMEC. *Tepelné zpracování ocelí*. [online]. b.r. [cit. 2018-05-18].
Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2810347>
- [6] HAMERNÍK, J. *Základy tepelného zpracování kovů*. [online]. b.r. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm
- [7] Metals handbook. *Prepared under the direction of the ASM International Handbook committee*. 9. ed., 1. printing. Metals Park, Ohio: American Soc. for Metals, 1988. ISBN 9780871700209.
- [8] Metaldyne [online]. Oslavany, 2014 [cit. 2018-05-22].
Dostupné z: <http://www.metaldyne.cz/>
- [9] EUROPEAN STEEL AND ALLOY GRADES. *C4C*. [online]. b.r. [cit. 2018-05-23].
Dostupné z:
http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=714
- [10] Bohdan Bolzano. *Přehled vlastností oceli 16MnCr5*. [online]. b.r. [cit. 2018-05-23].
Dostupné z:
https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10084/MOP_16MnCr5.pdf

- [11] Bohdan Bolzano. *Přehled vlastností oceli 20MnCr5*. [online]. b.r. [cit. 2018-05-23].
Dostupné z:
https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10084/MOP_20MnCr5.pdf
- [12] Sandvik Coromant. *ISO P Oceli*. [online]. b.r. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z:
https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_p_steel/pages/default.aspx
- [13] VIGNER, M. a Z. PŘIKRYL. *Obrábění*. 1. Praha: SNTL, 1984. ISBN 04-250-84.
- [14] Bohdan Bolzano. *Oceli k cementování podle normy ČSN EN 10084:2008 - přehled chemického složení*. [online]. b.r. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z:
http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10084/MOP_EN10084-chemicke_%20slozeni.pdf
- [15] Katedra materiálu a strojírenské metalurgie. *Metalografická pila*. [online]. b.r. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z:
http://www.kmm.zcu.cz/Pro_partnery/vybavenikatedry/
- [16] SKÁLOVÁ, J., R. KOVAŘÍK a V. BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-417-1.
- [17] Střední škola - Centrum odborné přípravy technické Kroměříž. *Metalografie - příprava vzorku pro pozorování mikroskopem*. [online]. b.r. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=31415&revision=-1&instance=2>
- [18] Haas. *Haas SL 40*. [online]. b.r. [cit. 2018-05-23].
Dostupné z: https://int.haascnc.com/mt_spec1.asp?intLanguageCode=1033&id=ST-40&webID=2AXIS_STD_LATHE

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Popis
Al	hliník
C	uhlík
Cr	chrom
Cu	měď
Fe	železo
Mg	hořčík
Mn	mangan
Ni	nikl
P	fofor
Pb	olovo
PKBN	polykrystalický nitrid bóru
S	síra
Si	křemík
V	vanad
W	wolfram

Symbol	Jednotka	Popis
HB	-	tvrdost podle Brinella
T_n	[min]	trvanlivost nástroje
VB	[mm]	opotřebení na hřbetu nástroje
VB_{opt}	[mm]	optimální opotřebení na hřbetu nástroje
a_p	[mm]	šířka záběru hlavního ostří nástroje
q	-	kvocient pro jednotlivé skupiny materiálů
i_0	-	index kinetické obrobitelnosti
t	[min]	čas
v_c	[m/min]	řezná rychlost
v_{c15}	[m/min]	řezná rychlost při trvanlivosti $T=15$ minut pro sledovaný materiál

Symbol	Jednotka	Popis
V_{c15et}	[m/min]	řezná rychlost při trvanlivosti T=15 minut pro etalonový materiál

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Inspekční certifikát pro Ø 28 mm

Příloha 2 Inspekční certifikát pro Ø 40 mm



A02 Druh dokumentu / Art der Prüfbescheinigung													
Inspekční certifikát 3.1 - Abnahmeprüfzeugnis 3.1, EN 10204:2004													
A01/A05 Výrobní závod / Herstellerwerk				Stránka / Seite									
TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech Republic				1/2									
A03 Číslo dokumentu / Bescheinigungsnummer				2018/01/005542-MAR									
A07 Číslo objednávky / Kundenbestellnummer			A06 Příjemce / Empfänger										
47113 00027			Metaldyne Oslavany, spol. s r.o.										
A10 Číslo kontraktu / Kontraktnummer			Padochovská 1/1117										
0041461980			664 12 Oslavany										
A08 Číslo zakázky / Werksauftragsnummer			Česká republika										
3300269866/000010													
B01, B09-B11 Popis výrobku / Rozměry / Tolerance Spezifikation der Produkt / Masse / Toleranz		B02, B04 Označení oceli / Stav dodaný Stahlbezeichnung / Lieferzustand		B03 Materiálová norma Materialnorm		B03 Rozměrová norma Massnorm							
Tyče kruhové loupané(h11) Rundstahl geschält(h11)		16MnCr5 +U		EN 10084:2008 EN 10263-3:2001 TL A2703-index -/ 08.09.2014		EN 10278							
28 mm + 0,000 - 0,130													
8,000 m +200 -0													
A11 Dopr. prostředek č. Wagen Nr.		A12 Ložný list č. Ladeliste Nr.		B07 Tavba Schmelze		B08 Kruhy / Kusy Ringen / Stück		B08 Svazky Krbd		B13 Hmotnost (kg) Gewicht (kg)			
9T08022 6T40277		3918500116		T60651		212		4		8226			
B07, B14, C70 Tavba / Rok výroby / Způsob výroby Schmelze / Herstellungsjahr / Stahlherstellung.		C71-C92 Chemické složení-Chemische Zusammensetzung [%]											
T60651/2017		C Mn Si P S Cu Cr Ni Al H											
BO-ZPO2		0.18 ✓ 1.11 ✓ 0.19 ✓ 0.015 ✓ 0.020 ✓ 0.02 ✓ 1.08 ✓ 0.03 ✓ 0.030 ✓ 0.90 ppm											
BO-Strangguss (150x150)		N Mo Sn 0.0120 0.033 0.002											
Mechanické hodnoty-Mechanische Werte													
B07 Tavba Schmelze		D56 Pěchovací zkoušky Stampfproben (EN 10263-1)		D57 Oduhličení Entkohlen (max. / mm)		C54 Mikročistota Reinheitsgrad (DIN 50602)		C57 Velikost zrna Korngrösse (ISO 643)		C30 Tvrdost HB Härte HB		C93 Vakuování Vakuumentgast	
T60651						S O S+O		8		182 - 190		ano/ja ✓	
K3: 1,95 0,39 2,30													
B07 Tavba Schmelze		D53 100% kontrola totožnosti Verwechselnprüfung 100%		D02 UZ kontrola US Prüfung		D54 Povrchové vady Oberflächenfehler							
T60651		provedena/entspricht		100%KSR=max.2 (EN10228-3/4)		100% EN 10277-1/4							



A02 Druh dokumentu / Art der Prüfbescheinigung								
Inspekční certifikát 3.1 - Abnahmeprüfzeugnis 3.1, EN 10204:2004								
A01/A05 Výrobní závod / Herstellerwerk					"A" - DOKUMENT		Stránka / Seite	
TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech Republic					A03 Číslo dokumentu / Bescheinigungsnummer			
					2018/01/002878-MAR			
A07 Číslo objednávky / Kundenbestellnummer				A06 Příjemce / Empfänger				
41555 00074				Metaldyne Oslavany, spol. s r.o.				
A10 Číslo kontraktu / Kontraktnummer				Padochovská 1/1117				
0041461982				664 12 Oslavany				
A08 Číslo zakázky / Werksauftragsnummer				Česká republika				
3300269952/000010								
B01, B09-B11 Popis výrobku / Rozměry / Tolerance Spezifikation der Produkt / Masse / Toleranz			B02, B04 Označení oceli / Stav dodaný Stahlbezeichnung / Lieferzustand		B03 Materiálová norma Materialnorm		B03 Rozměrová norma Massnorm	
Tyče kruhové loupané(h11) Rundstahl geschält(h11)			16MnCrS5+HL+U+PE		EN 10263-3:2001 EN 10084:2008 TL 0538 Index 02/ 27.11.2009		EN 10278	
40 mm + 0,000 - 0,160 7,000 m +200 -0								
A11 Dopr. prostředek č. Wagen Nr.		A12 Ložný list č. Ladefliste Nr.		B07 Tavba Schmelze	B08 Kruhy / Kusy Ringen / Stück	B08 Svazky Krbd	B13 Hmotnost (kg) Gewicht (kg)	
1TD3059 7T73644		3918500060		T63633	338	11	23588	
B07, B14, C70 Tavba / Rok výroby / Způsob výroby Schmelze / Herstellungsjahr / Stahlherstellung.		C71-C92 "A"-ZNAK / "A"-SYMBOL Chemické složení-Chemische Zusammensetzung [%]						
T63633/2017		C Mn Si P S Cu Cr Ni Al H						
BO-ZPO2		0.17/ 1.16/ 0.20/ 0.016/ 0.022/ 0.05/ 1.07/ 0.05/ 0.030/ 1.00 ppm						
BO-Strangguss (150x150)		N Mo Sn 0.0119 0.041/ 0.004/						
Mechanické hodnoty-Mechanische Werte								
B07 Tavba Schmelze	D56 Pěchovací zkoušky Stampfproben (EN 10263-1)	D57 Oduhličení Entkohlen (max. / mm)	C54 Mikročistota Reinheitsgrad (DIN 50602)			C57 Velikost zrna Korngröße (DBL 4027)	C30 Tvrdost HB Härte HB	C93 Vakuování Vakuumentgast
T63633/			K4: 0,00 0,00 0,00/			8 /	168 - 178	ano/ja /
B07 Tavba Schmelze	D53 100% kontrola totožnosti Verwechselfprüfung 100%		D02 UZ kontrola US Prüfung		D54 Povrchové vady Oberflächenfehler			
T63633	provedena/entspricht/		100% EN 10308/4/		"A" - ZNAK/"A" - SYMBOL 100% EN 10221/E /			



A02 Druh dokumentu / Art der Prüfbescheinigung

Inspekční certifikát 3.1 - Abnahmeprüfzeugnis 3.1, EN 10204:2004

A01/A05 Výrobní závod / Herstellerwerk

"A" - DOKUMENT

Stránka / Seite
2 / 2

TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s.,
Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech Republic

A03 Číslo dokumentu / Bescheinigungsnummer

2018/01/002878-MAR

B07

Tavba
Schmelze

C55

Prokalitelnost
Hartbarkeit nach Jomini

T63633 mm 1,5 3 5 7 11 15 20

HRC 45, 44, 41, 37/ 30/ 26/ 24/

D01

Kontrola povrchu, tvaru a rozměru odpovídá objednávce.
Die Kontrolle der Oberfläche, Form und Abmessung entspricht der Bestellung.

D05

Dodržená radioizotopická aktivita tavebního vzorku - max. 100 Bq/kg.
Die radioisotopische Aktivität max. 100 Bq/kg wurde eingehalten.

A04 / Značka výrobce /
Herstellingszeichen



Z01

Dodaný materiál odpovídá předpisu objednávky.
Die obengenannten Erzeugnisse entsprechen den Bestimmungsvorschriften.

Z03

Elektronická verze tohoto dokumentu je chráněna elektronickým podpisem v souladu s nařízením EU č. 910/2014.
Die elektronische Version dieses Dokuments ist mittels elektronischer Unterschrift entsprechend der Anordnung (EU) Nr. 910/2014 geschützt.

Z02

Potvrdil -Der Werksachverständige :
Kantor Adam, Ing.,

referent TJu, nezávislý oprávněný zástupce
Der Sachbearbeiter der Qualitätskontrolle für Freigabe und Atteste, unabhängiger berechtigter Vertreter

Třinec: 09.01.2018